

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

\_\_\_\_\_  
(повна назва інституту/факультету)

\_\_\_\_\_  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

“    ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

зі спеціальності (спеціалізації)

171 Електроніка  
(код і назва спеціальності)

на тему: Дослідження особливостей випромінювання звуку складними  
електроакустичними системами

Виконав (-ла): студент (-ка) VI курсу, групи

ДГЗ-71мп  
(шифр групи)

Фурсенко Владислав Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник доц. каф. АтаАЕ, к.т.н., доц. Богданова Н.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(назва розділу)

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент Доц. каф. ЗТ та РТ, к.т.н., доц. Трапезон К.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)    (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2018

## **Завдання на магістерську дисертацію**

### **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) факультет електроніки

Кафедра акустики та акустoeлектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дідковський В.С.

(підпис)

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

## **ЗАВДАННЯ**

### **на магістерську дисертацію студенту**

Фурсенко Владислав Віталійович

1. Тема дисертації «Дослідження особливостей випромінювання звуку складними електроакустичними системами».

Керівник дисертації доцент Богданова Наталія Володимирівна

Затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018р. № 4114с.

2. Термін подання студентом дисертації: 9.12.2018 р.

3. Мета дослідження: Створення випромінюючих систем складних конфігурацій з метою отримання плоскої характеристики напрямленості з максимальним кутом розриву в горизонтальній площині.

4. Вихідні дані: Форма характеристики напрямленості: в горизонтальній площині – не менше ніж 180 градусів, в вертикальній площині - близько 30 градусів, конфігурація системи випромінювачів.

5. Перелік завдань:

5.1. Дослідження характеристики напрямленості в двох площинах: вертикальній та горизонтальній; об'ємне зображення.

5.2. Дослідження коефіцієнта вісьової концентрації проаналізованих систем.

5.3. Аналіз та вибір оптимальних конфігурацій систем акустичних випромінювачів.

6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): Презентація в середовищі MS PowerPoint

7. Орієнтований перелік публікацій:

1) Богданова Н.В., Гайдаенко В.Г., Пономаренко В.А., Фурсенко В.В. Принцип построения и расчет помещения для домашнего кинотеатра. East European Scientific Journal. #10(38), 2018 part 2, Pp. 14-21

2) Богданова Н.В., Фурсенко В.В., Пономаренко В.А., Гайдаенко В.Г. Компьютерное моделирование системы излучателей в виде двойного линейного массива. East European Scientific Journal. #10(38), 2018 part 2, Pp. 67-72.

3) Богданова Н.В., Фурсенко В.В., Пономаренко В.А., Гайдаенко В.Г. Проблемы создания и акустического расчета современных домашних кинотеатров. East European Scientific Journal. #10(38), 2018 part 2, Pp. 73-79.

4) Фурсенко В.В. Дослідження характеристик направленості гучномовців симетричної системи типу «хрест». І Всеукраїнська науково-технічна конференція сучасні технології кіно та аудіовізуальних систем. Тези доповідей 26-28 листопада 2018 р. м. Київ. С. 35-37

8. Дата видачі завдання: 01.09.2018 р.

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір та вивчення джерел інформації для написання дипломної роботи; складання бібліографії наукових джерел	13-27.09.2018	
2	Складання плану дипломної роботи	28.09-06.10.2018	
3	Підготовка та написання першого розділу	07-20.10.2018	
4	Підготовка та написання другого розділу	21.10-26.10.2018	
5	Підготовка та написання третього розділу	26-07.11.2018	
6	Підготовка та написання четвертого розділу	07-14.11.2018	
7	Написання анотації, вступу, розділу стартапу та висновків	15-30.11.2018	
8	Виправлення зауважень	16-22.05.2018	
9	Оформлення дипломної роботи	02.12-7.12.2018	
10	Здача оформленої роботи на кафедру	14.12.2018	
11	Захист дипломної роботи	19.12.2018	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Фурсенко В. В.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Богданова Н. В.

## **Анотація**

Проводиться дослідження різноманітних складних конфігурацій випромінювачів з метою отримання характеристики напрямленості з якомога меншою шириною основного пелюстка в вертикальній площині випромінення і більшою - в горизонтальній.

Розраховуються та аналізуються характеристики напрямленості та коефіцієнти вісьової концентрації складних акустичних систем, що складаються з ненаправлених випромінювачів: подвійний лінійний масив, системи типу „хрест”. Аналіз здійснюється за допомогою побудови характеристик напрямленості в сферичній та декартовій системах координат, коефіцієнта вісьової концентрації в декартовій системі координат за допомогою матричної лабораторії MatLab.

Дослідження проведені в даній роботі є новими для електроакустики, тому, не зважаючи на побудову простих математичних моделей, мають в першу чергу вагоме значення теоретичних задач прикладної акустики. Надалі доцільним є продовження досліджень з урахуванням фізичних властивостей елементів та їх взаємодій.

Ключові слова: МОНОПОЛЬ, МАСИВ ВИПРОМІНЮВАЧІВ, ЗВУКОВЕ ПОЛЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯМЛЕННОСТІ, КОЕФФІЦІЄНТ КОНЦЕНТРАЦІЇ, СЕРЕДНЬООКТАВНА ЧАСТОТА.

## Summary

The researches of various complex configuration of oscillators are earned out in the Work. It has an aim of finding the directivity characteristics with most narrow width in vertical plane and most wide - in horizontal plane of radiation.

The directivity characteristics and axial concentration coefficients of complex acoustic systems composed of non-directional oscillators: linear double array, system of X-type.

Analysis is made in terms of construction of directivity characteristics in spherical system of axes and Cartesian coordinates, construction of axial concentration coefficient in Cartesian coordinates by means of Matrix Laboratory (MatLab).

The researches are made in present Work are new for Electrical Acoustic. It should be emphasized that foremost these researches are of great importance as theoretical tasks in spite of construction simple mathematical models. In prospect these researches should make with physical properties of oscillator interaction considered.

Keywords: MONOPOLE, ARRAY OF OSCILLATORS, SOUND FIELD, DIRECTIVITY CHARACTERISTICS, AXIAL CONCENTRATION COEFFICIENT, MIDDLE OCTAVE FREQUENCY.

## **Зміст**

<b>ВСТУП</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАНOSTІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ</b>	<b>10</b>
1.1. Системи озвучування та звукопідсилення	10
1.2. Принцип лінійного масиву групи випромінювачів	14
1.3. Концепція математичного моделювання	18
1.4. Метод розрахунку характеристики спрямованості групи випромінювачів шляхом подання їх у вигляді монополів	22
<b>РОЗДІЛ 2. СИСТЕМИ ВИПРОМІНЮВАЧІВ У ВИГЛЯДІ ПОДВІЙНОГО ЛІНІЙНОГО МАСИВУ</b>	<b>28</b>
2.1. Постановка задачі	28
2.2. Розрахунок характеристики спрямованості подвійного лінійного масиву	29
2.3. Розрахунок коефіцієнта осьової концентрації	34
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАНOSTІ СКЛАДНИХ АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ ТИПУ «ХРЕСТ»</b>	<b>39</b>
3.1. Симетричний «хрест»	39
3.2. Несиметричний «хрест»	48
3.2.1. «Хрест» з різною кількістю елементів в гілках	48
3.2.2. «Хрест» з різними відстанями між елементами в гілках	56
<b>РОЗДІЛ 4. СТАРТАП-ПРОЕКТ</b>	<b>65</b>
<b>ВИСНОВОК</b>	<b>67</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>69</b>

## ВСТУП

Одне з основних завдань теорії акустичного випромінювання зводиться до розрахунку звукового поля випромінювача, тобто Аналізу просторового розподілу звукового тиску, що створюються випромінювачем в необмежено тягучому середовищі. Вирішення цього завдання дає характеристику спрямованості випромінювача.

Як відомо, найбільш частою проблемою при створенні систем звукопідсилення, особливо в великих приміщеннях, є забезпечення гарної розбірливості мови і (або) музики. Джерелом багатьох проблем є реверберація. Як наслідок, різко падає розбірливість мови і музики.

Одним з найбільш ефективних варіантів розв'язання задачі є забезпечення такої спрямованості випромінювання звуку, при якій велика частина звукової енергії потрапляла б безпосередньо на слухачів. При цьому збільшується відношення потужності прямого звуку до ревербераційній фону.

Для отримання гострих характеристик спрямованості і для підвищення потужності застосовують масив випромінювачів. -

Якщо в гідроакустиці лінійні масиви використовуються давно, то в електроакустиці до них звернулися недавно. Але вже після закінчення цього короткого часу існуючі звукові системи, побудовані за технології лінійного масиву (LINE ARRAY), вже довели, що мають прекрасний звук, велике горизонтальне покриття, здатність озвучування просторів

Одним із способів дослідження різних систем є побудова їх математичних моделей.

Математичне моделювання має на увазі в першу їх наближений опис на мові мат рівнянь. Надалі математичне моделювання має на увазі вибір або розробку нових чисельних методів розв'язання

отриманих систем рівнянь (обчислювальна математика). Потім складається програма для комп'ютера, йде її налагодження і, нарешті, отримання результатів.



Ідея, покладена в основу дослідження полягає в тому, що безліч полів зі складною структурою можна подати простим і наочним способом як суперпозицію полів окремих джерел звукових коливань. Одним з найпростіших типів джерел є точкове джерело, або монополь.

Одним з найважливіших етапів дослідження є візуалізація різних процесів і характеристик модельованих систем, які здійснювалися в середовищі Matlab.

## **РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАНOSTІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОАКСТИЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ**

Застосування сучасних архітектурних рішень в створенні інтер'єр приміщень кінотеатрів, багатоцільових залів для глядачів, аудиторій концертних залів, залів сесійних засідань накладає обмеження на встановлення звукових колонок. Нахилене кріплення колонок на стінах може порушити цілісність інтер'єру перерахованих вище приміщень. Для того щоб приховати звукові колонки за декоративними покриттями, в стінах створюються ніші, в яких їх встановлюють. Але установка звукових колонок в нішах погіршує їх частотні характеристики, тому розположені випромінювачів в нішах неприйнятно.

Управління характеристикою спрямованості (кутом компенсації звукових колонок закріплених паралельно стіні у вертикальній площині) без зміни кута нахилу випромінювачів щодо стіни дозволяти виключити недоліки в озвучуванні приміщень при розміщенні звукових колонок в нішах.

У цьому полягає перевага компенсованих звукових колонок. Також доцільно проводити дослідження характеристик спрямованості систем випромінювачів з різними нестандартними конфігураціями елементів, які поряд з завданнями озвучування і звукопідсилення приміщень, могли б забезпечити вирішення завдання збереження декоративного оформлення приміщень.

### **1.1. Системи озвучування та звукопідсилення**

В останні роки одна з нових областей електроакустики - техніка озвучення - набуває все більшого значення. Якщо раніше завданням систем озвучення було в основному посилення людського голосу (ораторів співаків), то тепер у великих приміщеннях, розрахованих на 1000 - 3000 слухачів, потрібне посилення і звукових сигналів, що створюються музичними інструментами. Крім того, електроакустичні системи все ширше і ширше використовуються в усіх громадських спорудах для

інформаційної служби, як засобу забезпечення тих чи інших звукових ефектів, для посилення музичних і мовних фрагментів, які супроводжують дію в драматичних театрах. За допомогою таких систем можна поліпшити «акустику» або узгодити їх акустичні особливості з різноманітними за характером програмами. Чим більше стають розміри сцени і самих залів, тим складніше забезпечити надійну локалізацію джерел сигналу. Сучасні лінії затримки звукових сигналів створили необхідні передумови для вирішення цього завдання; вони вимагають, однак, інших принципів побудови систем звукопідсилення [1].

З практики відомо, що якщо приміщення має об'єм понад 2000 м<sup>3</sup> або довжину понад 20 м, то голоси людини, як правило, вже недостатньо для того, щоб створити рівень гучності в віддалених точках цього приміщення, необхідний для повної зрозумілості переданої мови. А якщо рівень шумів в приміщенні перевищує 60 дБ, то і в невеликих приміщеннях (об'ємом близько 200 м<sup>3</sup>) потужності людського голосу недостатньо для отримання повної зрозумілості мови. У цих випадках необхідно застосовувати звукопідсилювальну апаратуру, що складається з мікрофонів, підсилювачів і гучномовців [2-4].

Звукопідсилення полягає в тому, що відсутня акустична потужність випромінюється гучномовцями, які зв'язуються через підсилювач з мікрофоном, які приймають звучання природних джерел. Істотна особливість систем звукопідсилення полягає в тому, що мікрофони знаходяться в звуковому полі пов'язаних з ними гучномовців; тому системи звукопідсилення є системами зі зворотним зв'язком [3]. Це явище обмежує можливості системи звукопідсилення. Але іноді доводиться мати справу з передачею інформації в приміщення, ізольовані від первинного джерела звуку (від диктора, лектора і т. п.). У таких випадках для передачі інформації застосовується система озвучення, що складається з вторинних джерел звуку - гучномовців. При цьому вже немає обмеження індексу тракту в формі зворотного зв'язку.

При передачі мови визначальним є забезпечення необхідної розбірливості мови в усіх точках приміщення, навіть найвіддаленіших від основного джерела

звучу, так як від лектора, оратора, читця і т.п. Інакше розробляється система не буде виконувати свого основного призначення.

Як впливає з попереднього, для виконання цієї вимоги необхідно, щоб тракт забезпечував відповідні перевищення спектральних рівнів мови над спектральними рівнями перешкод шумів, а це залежить як від загального рівня мови, так і від частотної характеристики апаратури.

Таблиця 1.1. Оптимальные значения параметров звукового поля, дБ

Призначення установки	Номінальний рівень	Нерівномірність озвучення	Макс. акустичне відношення
Відтворення музики і театральних ефектів	100	6	8-10
Відтворення музикальних програм, підсилення солістів	94-96	6	8-10
Відтворення розважальних музикальних програм, музики і мови в шумних приміщеннях	94-96	8	4-6
Підсилення мови при низьких рівнях шуму	80-86	6	4-6
Створення музикального фону	60-70	8	8-10

Для забезпечення зазначених вимог показники тракту (нерівномірність частотної характеристики; номінальне звуковий тиск, що розвивається гучномовцями; спрямованість і чутливість гучномовців і мікрофонів; потужність підсилювального пристрою; нелінійні спотворення; шуми і т. п.) повинні задовольняти відповідним нормам на ці показники.

Третьою вимогою до систем звукопідсилення і озвучення є, можливо, менша нерівномірність озвучення, По можливості мінімальна зміна рівня звучання від точки до точки. Величина нерівномірності визначається як різниця:

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min}$$

Нерівномірність озвучення складається з двох частин: нерівномірності середніх значень рівня і інтерференційної нерівномірності, що створюється в разі застосування декількох гучномовців. Нерівномірність по середнім значенням призводить до того, що якщо в найвіддаленіших точках приміщення забезпечено необхідний рівень, то в ряді точок він може виявитися завищеними. Наслідком цього є непотрібна перевантаження слуху; зайвий витрата потужності; неприємне відчуття, яке відчувається слухачем при його переміщенні по приміщенню. Тому в приміщеннях не допускається нерівномірність озвучення більше 6 дБ. Взагалі ж завжди, коли це не суперечить вимогам економічності техніки обслуговування, прагнуть до зниження нерівномірності озвучення.

лід також зазначити, що відповідно основним призначенням системи звукопідсилення необхідно, щоб слухач, що знаходиться в віддаленій точці, тобто в точці з максимальним акустичним ставленням, мав ті ж умови чутності, що і слухач, що знаходиться поблизу основного (первинного) джерела звуку. Зокрема, це відноситься до рівня передачі. Якщо вважати, що слухач на відстані 1,5-2 м від лектора, оратора і т. п. знаходиться на оптимальних умовах слухання, а мікрофон зазвичай розташовується на відстані 0,3-0,5 м від мовця, тоді індекс передачі тракту

$$Q_{m.c} = 20\lg\left(\frac{r_m}{r}\right) = -20\lg 4 = -12$$

Тому орієнтовний індекс передачі тракту для мовлення знаходиться в межах  $-10 \div -14$  дБ. Але ця величина справедлива тільки для випадку низьких рівнів шумів.

З аналогічних міркувань були визначені необхідні індекси передачі і для звукопідсилювальної апаратури іншого призначення. У таблиці 1.2 наведені відповідні рекомендації.

Таблиця 1.2. Розрахунок оптимального індексу передачі

Призначення установки	Відстань від джерела звуку до мікрофону $r_m$ , м	Оптимальна відстань від джерела звуку до слухача $r_c$ , м	Оптимальний індекс передачі, дБ
Підсилення мовлення	0,3-0,5	1-1,5	-10 ÷ -14
Підсилення оркестрів, хорів, ансамблей	3	1	-12
Підсилення голосу солістів при віддаленому мікрофоні	1-2	3-6	-10
Підсилення голосу солістів при близькому розміщенні мікрофону	0,05-0,1	3-6	-36

Встановилась така класифікація систем озвучення приміщенні і відкритих просторів: зосереджені, зональні і розподілені [4].

## 1.2. Принцип лінійного масиву групи випромінювачів

Як відомо (в тому числі і з повсякденного досвіду), найбільш частою проблемою при створенні систем звукопідсилення, особливо в великих приміщеннях, є забезпечення гарної розбірливості мови і (або) музики.

Сутність реверберації полягає в тому, що енергія звукових хвиль накопичується в приміщенні, при цьому створюється фон зі звуків, перемішаних в часі і просторі. При великому часу реверберації рівень цього фону може набагато перевершувати рівень корисного сигналу. Як наслідок, різко падає розбірливість мови і музики.

Збільшення потужності звукопідсилювальної системи в такому випадку марно, набагато більше користі приносить зниження часу реверберації і забезпечення такої спрямованості випромінювання звуку, щоб більша частина звукової енергії від гучномовців потрапляла безпосередньо на слухачів.

Мета цих заходів - збільшити відношення потужності прямого звуку до ревербераційній фону (гулу). Ще один метод, застосовуваний для поліпшення розбірливості мови, полягає в "зрізанні" низькочастотної частини спектра (зазвичай нижче 400 Гц - 1 кГц). При цьому використовується той фактор, що вище 1 кГц час реверберації зазвичай зменшується, а спрямованість гучномовців зростає.

Незважаючи на те, що ефективність усіх цих методів підвищення розбірливості перевірена часом, їм притаманний ряд принципових проблем. По-перше, зниження часу реверберації і придушення найбільш заважають віддзеркалень в уже наявних приміщеннях неминуче вимагає перепланування або установки звукопоглинальних елементів. А це далеко не завжди можливо. Наприклад, в історичній будівлі зміна інтер'єру часто неприпустимо в принципі. По-друге, традиційні спрямовані гучномовці на основі рупорів володіють задовільними

характеристиками, але дуже громіздкі - для ефективної роботи діаметр (і довжина) рупора повинен бути порівняний з довжиною хвилі, а довжина звукової хвилі на частоті 100 Гц складає 3,35 м. Подібні габарити в приміщеннях, тим більше історичних, зазвичай неприйнятні. І по-третє, "зрізання" низькочастотної частини спектра різко спотворює тембр звучання, що неприпустимо в разі художньому мовленні.

Якщо взяти іншу ситуацію: необхідно озвучити гучний старовинний собор. Звукопоглиначі ставити нікуди - на стінах фрески, і інтер'єр міняти не можна. Єдине, що можна зробити в такій ситуації - використовувати максимально спрямовані акустичні системи, щоб до слухачів приходила якомога більша частка прямого звуку в порівнянні з відбитим. Однак встановлювати громіздкі традиційні системи в подібних випадках, як правило, неможливо. Але звукопідсилення необхідно.

До недавнього часу така ситуація була практично безвихідній, якщо не брати до уваги вкрай незручних варіантів з установкою гучномовців в кожне крісло або роздачею навушників.

Зараз подібні проблеми можна вирішити шляхом використання акустичних систем з іншим способом формування спрямованості - не з допомогою рупорів, а за допомогою масиву випромінювачів.

Для формування спрямованого випромінювання звуку в принципі є два основних способи. Перший - це всім відомі громіздкі рупорні системи, вони, до речі, мають і найвищим коефіцієнтом корисної дії (що доходить до 30%). Другий - використання масивів випромінювачів, коли завдяки спільній роботі багатьох гучномовців формується направлене джерело звуку. Є і третій - застосування дзеркал, що фокусують звук, але вони ще більш громіздкі, ніж рупори.

Ідея використання масиву випромінювачів не нова і відома ще з 40-50-х років (див.: Олсон, "Acoustical Engineering", 1940, де розглядаються масиви градієнтних мікрофонів, і Беранек, "Acoustics",

1954 році, де є глава про лінійних масивах). У 70-і роки фірма JBL поставляла дві подібні системи - 4375 і 4380.

Принцип створення спрямованої дії масиву випромінювачів (рис. 1.1) полягає в тому, що коли все випромінювачі створюють однакові звукові хвилі, то в напрямку А вони складаються. При відхиленні від цього напрямку з'являється різниця відстаней до різних випромінювачів і відповідно різниця фаз. При цьому ефективність підсумовування зменшується, більш того, можливо навіть повне знищення випромінювання в певних напрямках через взаємної компенсації випромінювань, що знаходяться в протифазі з-за різниці шляхів до відповідних випромінювачів (див. рис. 1.1, напрямок В). Чим більше розмір масиву випромінювачів по відношенню до довжини хвилі, тим гостріше виявляється його спрямованість. Основною перевагою масиву випромінювачів є його компактність - великі розміри потрібні тільки в одному напрямку, причому перпендикулярному до напрямку випромінювання, тобто така система може бути зроблена плоскою (формується вузький промінь) або у вигляді вузької колони (діаграма спрямованості являє собою диск, "нанизані" на колону - рис. 1.2). Саме компактність таких систем і становить інтерес.



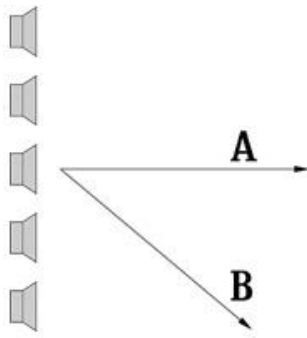


Рис. 1.1. Вертикальний ряд випромінювання



Рис. 1.2. Вид просторової діаграми напрямленості

Вищевикладене справедливо в разі, коли всі гучномовці ідеально однакові, не володіють власною спрямованістю випромінювання і працюють на одній-єдиній частоті. На практиці ж ці умови виконати безпосередньо неможливо, хоча б тому, що будь-яка акустична система повинна працювати в деякій смузі частот, а, отже, і довжин хвиль. Типовим діапазоном частот для високоякісних систем озвучування може служити 100 Гц - 10 кГц. При цьому довжини звукових хвиль відрізняються в 100 разів, і якщо на низьких частотах спрямованість, як правило, недостатня, то на високих теоретично виявляється надмірно велика (на практиці розкид характеристик випромінювачів призводить до неможливості точного підсумовування, що зменшує спрямованість). Крім зміни ступеня спрямованості з частотою, на середніх частотах зазвичай виникає багато додаткових максимумів. Нарешті, ефективність подібних акустичних систем виявляється нижче, ніж у рупорних систем, що вимагає більшої потужності підсилювачів.

Перераховані обставини призвели до того, що, не дивлячись на компактність, комерційні зразки акустики спрямованої дії на основі лінійок випромінювачів до останнього часу за характеристиками були неконкурентоспроможні з рупорними.

Однак в останні кілька років ситуація принципово змінилася, і завдяки появі нових технологій цифрової обробки сигналів акустичні системи на основі масиву випромінювачів виявилися не тільки конкурентоспроможні, але і незамінні, коли

потрібно якісно озвучити "важкі" об'єкти, наприклад храм з часом реверберації близько 9 с.

Ключем до успіху стала поява можливості цифрового формування незалежних сигналів для кожного гучномовця (або кожної пари гучномовців), що входять до складу колони, з окремими підсилювачами. Завдяки цьому вдалося не тільки практично усунути зміни діаграми спрямованості з частотою, але і отримати можливість електронного управління її формою, причому при необхідності - з урахуванням умов установки [5].

### **1.3. Концепція математичного моделювання**

Математичне моделювання має на увазі в першу чергу вивчення процесів (об'єктів, явищ), їх наближений опис на мові математики. Однак в більшості випадків точні рішення отриманих систем або неможливі, або вони виливаються в якісь приватні рішення, асимптотики, рішення сильно спрощених моделей малої розмірності і т.д.

Надалі математичне моделювання має на увазі вибір або розробку нових чисельних методів розв'язання отриманих систем рівнянь. Потім складається програма для комп'ютера, йде її налагодження, отримання результатів. Іноді говорять про тріаді модель \_ алгоритм - програма. Важливим етапом інтерпретації отриманих результатів є їх візуалізація.

Елементи тріади можуть впливати на один одного, причому як в прямому, так і зворотному порядку. Дану ланцюжок доведеться пройти не один раз, уточнюючи модель, вибираючи чисельні методи і алгоритми, переписуючи блоки програм, до тих пір, поки не буде отримана згода з контрольними натуральними експериментами. Іноді такий експеримент може бути доріг зли небезпечний. В цьому випадку може йти мова про порівняння з серією підібраних аналітичних рішень.

Ця робота вимагає певного мистецтва, великих труднощів, акуратності. Але це того варте. Хороша математична модель з відлагодженою комп'ютерною

програмою надає вченому досліднику дуже широкі можливості. Він може, не проводячи нових дорогих або натуральних експериментів, вивчати процеси (об'єкти, явища) з допомогою комп'ютера і з'ясовувати навіть такі подробиці, які неможливо отримати інакше. Це приносить величезний економічний ефект і скорочує терміни досліджень.

Математичне моделювання відкриває широкі перспективи для багатьох напрямків науки і техніки. Моделювання багато років вже використовується в передових областях ядерної та авіаційно-космічної.

Певною частиною своїх великих досягнень ці напрямки зобов'язані саме математичного моделювання.

В даний час математичне моделювання проникло в усі галузі природничих наук і навіть в такі сфери людської діяльності, як економіка, політика, соціологія, медицина, фінанси, транспорт, екологія та багато ін. Звичайно, найбільш успішним є використання математичного моделювання там, де вдається сформулювати якісь універсальні закономірності (наприклад, закони збереження в механіці суцільних середовищ) і адекватні математичні моделі [6].

### ***Принципи побудови математичних моделей***

Вивчаючи складні об'єкти, ми не можемо врахувати всі чинники. Якісь виявляються найбільш важливими, а якимись треба знехтувати. При цьому з'являється модель об'єкта. Це така подумки представимо або матеріально реалізована система, яка відображаючи або відтворюючи об'єкт дослідження, здатна заміщати його так, що її вивчення дає нам нову інформацію про нього. Термін «модель» походить від латинського *modus, modulus* (міра, образ, спосіб і т.д.) [7].

Моделювання це заміщення досліджуваного об'єкта (оригіналу) його умовним чином або іншим об'єктом (моделлю) і вивчення властивостей оригіналу шляхом дослідження властивостей моделі.

Очевидно, що дійсна користь від моделювання може бути отримана тільки при дотриманні двох умов:

- модель забезпечує коректне (адекватне) відображення властивостей оригіналу, істотних з точки зору досліджуваної операції;

- модель дозволяє усунути проблеми, властиві проведенню вимірів на реальних об'єктах.

Математична модель являє собою формалізований опис системи (або операції) на деякому абстрактному мовою, наприклад у вигляді сукупності математичних співвідношень або схеми алгоритму.

Розглянемо основні принципи моделювання:

- Принцип інформаційної достатності. При повній відсутності інформації про досліджувану систему побудова її моделі неможливо. При наявності повної інформації про систему її моделювання позбавлене сенсу. Існує певний критичний рівень апріорних відомостей про систему (рівень інформаційної достатності), при досягненні якого може бути побудована її адекватна модель.

- Принцип здійсненності. Створювана модель повинна забезпечувати досягнення поставленої мети дослідження з ймовірністю, істотно відрізняється від нуля, і за кінцевий час. Зазвичай задають деяке порогове значення  $P_0$  ймовірності досягнення мети моделювання  $P(t)$ , а також прийнятну кордон  $З$  часу досягнення цієї мети. Модель вважають здійсненою, якщо може бути виконана умова  $P(t_0) \geq P_0$ .

- Принцип множинності моделей. Даний принцип є ключовим. Йдеться про те, що створювана модель повинна відображати в першу чергу ті властивості реальної системи (або явища), які впливають на обраний показник ефективності. Відповідно при використанні будь-якої конкретної моделі пізнаються лише деякі сторони реальності. Для більш повного її дослідження необхідний ряд моделей, що дозволяють з різних сторін відображати розглянутий процес.

- Принцип агрегування. У більшості випадків складну систему можна уявити що складається з агрегатів (підсистем), для адекватного математичного опису яких виявляються придатними деякі стандартні математичні схеми. Принцип агрегування

дозволяє, крім того, досить гнучко перебудовувати модель залежно від завдань дослідження.

Принцип параметризації. У ряді випадків модулюєма система має в своєму складі деякі відносно ізольовані підсистеми, що характеризуються певним параметром, в тому числі векторних. Такі підсистеми можна замінювати в моделі відповідними числовими величинами, а не описувати процес їх функціонування. При необхідності залежність значень цих величин від ситуації може здаватися в вигляді таблиці, графіка або аналітичного виразу (формули). Принцип параметризації дозволяє скоротити обсяг і тривалість моделювання. Однак необхідно мати на увазі, що параметризація знижує адекватність моделі [8].

### ***Технологія комп'ютерного моделювання***

Комп'ютерне моделювання - це математичне моделювання з використанням засобів обчислювальної техніки. Відповідно технологія комп'ютерного моделювання передбачає виконання таких дій:

1. Визначення мети моделювання.
2. Розробка концептуальної моделі.
3. Формалізація моделі.
4. Програмна реалізація моделі.
5. Планування модельних експериментів.
6. Реалізація плану експерименту.
7. Аналіз та інтерпретація результатів моделювання.

Зміст перших двох етапів практично не залежить від математичного методу, покладеного в основу моделювання (і навіть навпаки - їх результат визначає вибір методу). Тоді як реалізація решти п'яти етапів істотно розрізняється для кожного з двох основних підходів до побудови моделі: аналітичного та імітаційного.

Аналітичне моделювання передбачає використання математичної моделі реального об'єкта в формі алгебраїчних, диференціальних, інтегральних та інших рівнянь, що зв'язують вихідні змінні з вхідними, доповнених системою обмежень.

При цьому передбачається наявність однозначної обчислювальної процедури отримання точного рішення рівнянь.

При імітаційному моделюванні використовується математична модель відтворює алгоритм («логіку») функціонування досліджуваної системи в часі при різних поєднаннях значень параметрів системи і зовнішнього середовища [8].

#### **1.4. Метод розрахунку характеристики спрямованості групи випромінювачів шляхом подання їх у вигляді монополів**

##### ***Монополь (точкове джерело)***

Сферичні хвилі знаходять використання при вирішенні різних завдань, оскільки безліч полів з більш складною структурою можна подати простим і наочним способом як суперпозицію сферичних хвиль. Одним з найпростіших типів джерел, що породжують сферичну хвилю є точкове джерело, або монополь.

До поняття точкового джерела можна прийти, розглядаючи пульсуючу сферу радіуса  $a$ . Потенціал пульсуючої сфери.

$$\varphi(r, t) = \frac{v_0}{r} \frac{a}{1 - ika} e^{-i(\omega t - kr + ka)} \quad (1.1)$$

Розглянемо окремий випадок, коли радіус сфери набагато менший за довжину хвилі ( $a \ll \lambda$ ) при цьому  $ka \rightarrow 0$ . Знехтуємо ( $ka$ ) в знаменнику і в показнику експоненти (1.1). Помноживши після цього чисельник і знаменник на  $4\pi$  і враховуючи, що  $4\pi a^2 = S$  - площа сфери, отримаємо

$$\varphi(r, t) = \frac{v_0 S}{4\pi r} e^{-i(\omega t - kr)} \quad (1.2)$$

Величина, рівняючи помноженої швидкості поверхні випромінювача на його площу називається об'ємною швидкістю джерела,  $av_0 S = V_0$  амплітудне значення об'ємної швидкості, або продуктивність.

Продуктивність є зміна обсягу середовища за одиниць часу (вимірюється в кубічних метрах на секунду,  $\text{м}^3 / \text{с}$ ).

Через амплітуду продуктивності потенціал швидкості визначається формулою

$$\varphi(r, t) = \frac{V_0}{4\pi r} e^{-i(\omega t - kr)} \quad (1.3)$$

Джерело, що формує звукове поле, по (1.3), називається точковим джерелом, або монополія. Поняття пульсуючого джерела визначає, що амплітуда і фаза швидкості коливань однакові для всіх точок його поверхні.

Точковим джерелом можна назвати будь-який пульсуючий випромінювач, розміри якого набагато менше від довжини хвилі [9].

### *Група точкових джерел*

Тиск  $p(\mathbf{u})$ , що розвивається в далекому полі лінійної системою, що складається з  $n$  елементів, в напрямку, який визначається одиничним радіус вектором  $\mathbf{u}$ , дорівнює

$$p(u) = \sum_{q=1}^n p_q(u) = w_1 \sum_{q=1}^n A_q p'_q(u) \quad (1.4)$$

де  $p_q(u)$  - тиск, що розвивається елементом системи з номером  $q$ , віднесене до нормальної складової швидкості коливань його поверхні  $\omega_q$ , тобто

$$p'_q(u) = \frac{p_q(u)}{w_q}, \quad (1.5)$$

$A_q$  - комплексний коефіцієнт збудження, що дорівнює відношенню  $w_q$  до нормальної складової швидкості коливань елемента системи, прийнятого за опорний. Вводяться до розгляду модуль  $|A_q| = a_q$  - коефіцієнт амплітудного розподілу і аргумент  $\arg A_q = \alpha_q$  - коефіцієнт фазового розподілу, тобто

$$A_q = \frac{w_q}{w_1} = a_q \exp(i\alpha_q) \quad (1.6)$$

Складові  $p'_q(u)$  виразу (1.4) повинні бути записані в єдиній системі координат, тобто відстані  $r$ , що входять в ці складові, повинні відрховуватися від загального для всіх елементів системи початку координат до точки спостереження.

Відомо, що тиск розвивається елементом з номером  $q$ , записане щодо його центру, дорівнює тиску, що розвивається цим же елементом, що знаходяться на початку координат всієї системи, помноженому на вираз  $\exp(-ik\rho_q u)$ . Тому в загальному випадку вираз (1.4) записується у вигляді

$$p(u) = w_1 \sum_{q=1}^n A_q p'_q(u) \exp(-ik\rho_q u) \quad (1.7)$$

де під  $p_q(u)$  розуміється віднесене до коливальної швидкості тиск, розвивається в далекому полі системи елементів з номером  $q$  при загальмованих інших елементах, причому відлік відстані  $r$  до точки спостереження ведеться в вираженні  $p_q(u)$  так, ніби елемент розташовується в загальному для всієї системи початку координат.

Характеристикою спрямованості в режимі випромінювання  $D(\mathbf{u})$  називають відношення звукового тиску, що розвиваються акустичною системою в далекому полі в довільному напрямку  $\mathbf{u}$  та у деякому фіксованому напрямку  $\mathbf{u}_0$  на одному і тому ж відстані від системи. Зазвичай під напрямком  $\mathbf{u}_0$  розуміють напрямок максимального випромінювання або напрямок компенсації, проте іноді (зокрема, коли максимального випромінювання невідомо заздалегідь або воно змінюється зі зміною частоти) напрямок  $\mathbf{u}_0$  вибирається довільно. Напрямок  $\mathbf{u}_0$  називають напрямком нормування характеристики спрямованості.

Характеристика спрямованості в загальному випадку - функція комплексна, тому в розгляд вводять амплітудну  $R(\mathbf{u})$  і фазову  $r_x(\mathbf{u})$  характеристики спрямованості. Таким чином,

$$D(u) = \frac{p(u)}{p(u_0)} = R(u) e^{ir_x(u)} \quad (1.8)$$

$$D(u) = \frac{\sum_{q=1}^n A_q p'_q(u)}{\sum_{q=1}^n A_q p'_q(u)} = \frac{\sum_{q=1}^n A_q D_q(u)}{\sum_{q=1}^n A_q D_q(u)} \quad (1.9)$$



Найпростішою математичною моделлю розрахунку системи є модель прозорості системи, для якої передбачається, що взаємне обурення поля окремих її елементів дуже малий. Така модель використовується для розрахунку поля дискретної системи з розрідженим постановкою елементів, що мають малі в порівнянні з довжиною хвилі розміри. Розрахунок поля такої системи зводиться до простого підсумовування полів окремих точкових джерел звукових коливань.

При введенні фазового розподілу, що забезпечує компенсацію системи в напрямку  $\mathbf{u}_0$  формула (1.9) набуває вигляду

$$D(u) = \left( \sum_{q=1}^n a_q |p'_q(u_0)| \right)^{-1} \sum_{q=1}^n a_q p'_q(u) \exp[-i \arg p'_q(u_0)] \quad (1.10)$$

В окремому випадку системи, що складається з монополів, характеристика спрямованості визначається формулою

$$D(u) = \left( \sum_{q=1}^n A_q \exp(-ikp_q u_0) \right)^{-1} \sum_{q=1}^n A_q \exp(-ikp_q u) \quad (1.11)$$

Якщо система компенсована в напрямку  $\mathbf{u}_0$ , то

$$D(u) = \left( \sum_{q=1}^n a_q \right) \sum_{q=1}^n A_q \exp[-ikp_q (u - u_0)] \quad (1.12)$$

У формулу визначальну, характеристику спрямованості системи входить скалярний добуток векторів  $\mathbf{p}\mathbf{u}$ . У більшості випадків це твір зручно обчислювати як суму творів одночасних проекцій векторів-співмножників:

$$p\mathbf{u} = p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z \quad (1.13)$$

У сферичній системі координат (рис. 1.3) напрямок в просторі описується двома кутами: кутом  $\theta$  (відлічуванім від осі  $z$ ) і кутом  $\varphi$  (відлічуванім в площині  $xOy$  від осі  $x$  до проекції вектора  $\mathbf{u}$  на площину  $xOy$ ).

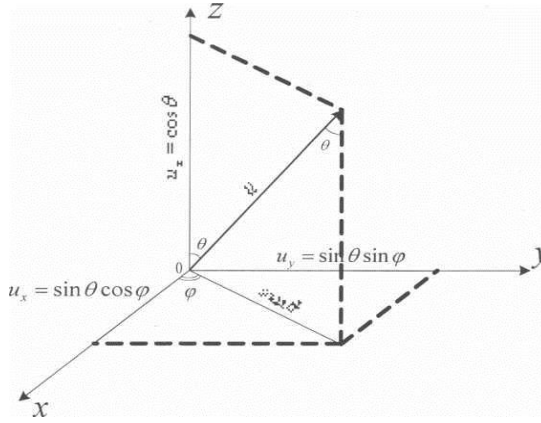


Рис. 1.3. Сферична система координат

В цій системі проекції одиничного радіуса вектора  $\mathbf{u}$  на осі координат рівні:

$$u_x = \sin \theta \cos \varphi; \quad u_y = \sin \theta \sin \varphi; \quad u_z = \cos \theta \quad (1.14)$$

Якщо проекції радіуса вектора  $\rho_q$  на осі координат обозначить как  $x_q$ ,  $y_q$  и  $z_q$  то

$$\rho_q \mathbf{u} = x_q \sin \theta \cos \varphi + y_q \sin \theta \sin \varphi + z_q \cos \theta \quad (1.15)$$

В окремому випадку, коли всі елементи системи лежать в котрійсь із координатних площин, одна зі складових радіус-векторів  $\rho_q$  звертається в нуль.

Так, якщо система лежить в площині  $yOz$ , то  $x_q = 0$  та

$$\rho_q \mathbf{u} = x_q \sin \theta \cos \varphi \quad (1.16)$$

$$\rho_q \mathbf{u} = y_q \sin \theta \sin \varphi \quad (1.17)$$

$$\rho_q \mathbf{u} = z_q \cos \theta \quad (1.18)$$

Цілком аналогічно обчислюються скалярні похідні виду  $\rho_q(u - u_0)$ , що зустрічаються у висловлюваннях, що описують параметри систем, компенсованих в напрямку  $\mathbf{u}_0$ . Якщо цей напрям в сферичній системі координат визначаються кутами  $\theta_0$  та  $\varphi_0$ , то в загальному випадку

$$\rho_q(u - u_0) = x_q(\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0) + y_q(\sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_0 \sin \varphi_0) + z_q(\cos \theta - \cos \theta_0) \quad (1.19)$$

Положення точки спостереження в просторі можна описувати і в інших системах координат.

Так, якщо напрямок одиничного радіус-вектора  $\mathbf{u}$  визначати його направляють косинусами (тобто косинусами кутів, утворених вектором  $\mathbf{u}$  і позитивними напрямками осей координат (рис. 1.4), то

$$p_q u = x_q \cos \alpha + y_q \cos \beta + z_q \cos \gamma \quad (1.20)$$

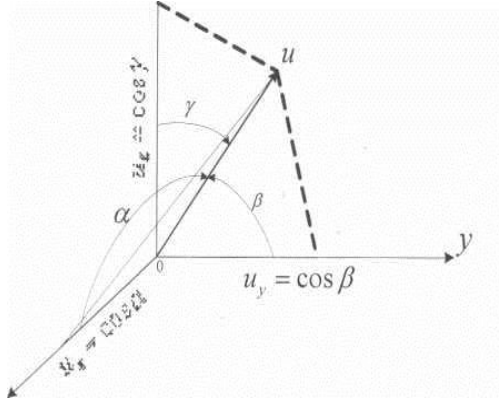


Рис. 1.4. Визначення положення одиничного вектора простору за допомогою напрямних косинусів [10].

Коефіцієнт концентрації дискретної антени, що складаються з напрямлених елементів, в напрямленні  $\mathbf{u}_0$  дорівнює при довільному амплітудно-фазовому розподілу

$$K = \frac{|\sum_{q=1}^n A_q \exp(-ikp_q u_0)|^2}{\sum_{q=1}^n \sum_{g=1}^n A_q A_g^* \frac{\sin k |p_q - p_g|}{k |p_q - p_g|}} \quad (1.21)$$

та при компенсації системи в напрямленні  $\mathbf{u}_0$

$$K = (\sum_{q=1}^n a_q)^2 \left\{ \sum_{q=1}^n \sum_{g=1}^n a_q a_g \cos[ku_0(p_q - p_g)] \frac{\sin k |p_q - p_g|}{k |p_q - p_g|} \right\}^{-1} \quad (1.22)$$

де  $n$  - кількість елементів;  $q$  - номер елемента;  $A_q = a_q \exp(i\alpha_q)$ ;  $|A_q| = a_q$  - коефіцієнт амплітудного розподілу;  $\mathbf{u}_0$  - одиничний радіус-вектор, що визначає напрямлення випромінювання;  $|p_q - p_g|$  - відстань між центрами елементів з номерами  $q$  та  $g$ .

## РОЗДІЛ 2. СИСТЕМИ ВИПРОМІНЮВАЧІВ У ВИГЛЯДІ ПОДВІЙНОГ ЛІНІЙНОГО МАСИВУ

### 2.1. Постановка задачі

Група випромінювачів розташовується у вільному просторі в одній площині. В якості випромінювачів використовуються точкові ненаправленні джерела (монополі).

Вважається, що нам відомо поле, створюване кожним випромінювачем окремо і що при спільній дії кожен випромінювач працює так само, як і в поодиночці.

У розрахунку не враховується взаємний вплив випромінюючих елементів. Припускаємо, що випромінювачі «прозорі» для полів інших випромінювачів. У цьому сенсі - випромінювачі, розташовані один від одного на відстанях, великих в порівнянні з їх розмірами.

Для розрахунку характеристики спрямованості використовуємо принцип суперпозиції звукових хвиль [11, 12, 13, 14].

Дослідження характеристик спрямованості систем проводиться в середнеоктавних смугах частот: 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц.

Відстань між елементами  $d$  вибирається рівним 0,2 м.

На рис. 2.1 представлено схематичне розташування групи випромінювачів в сферичній системі координат.

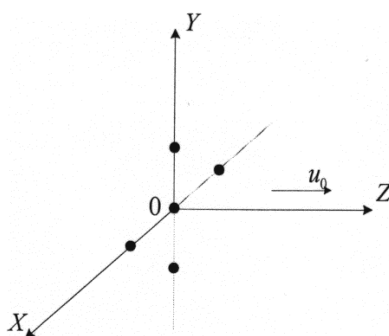


Рис. 2.1. Розташування групи випромінювачів в сферичній системі координат

Площина  $XOY$  - площина розташування групи випромінювачів;

$u_0$  - напрямок випромінювання (паралельно осі  $Z$ );

$XOZ$  - горизонтальна площина випромінювання;

$YOZ$  - вертикальна площина випромінювання.

Коефіцієнт осьової концентрації систем випромінювачів розраховується для відносини  $d / \lambda$ . Значення  $d / \lambda$  беруться від 0 до 1,5.

Для дослідження характеристик спрямованості використовується побудова діаграм спрямованості в сферичних і декартових системах координат, а також коефіцієнта осьової концентрації в декартовій системі координат в системі матричної лабораторії Matlab.

## 2.2. Розрахунок характеристики спрямованості подвійного лінійного масиву

Розглянемо характеристику спрямованості на середнеоктавних частотах, а також коефіцієнт осьової концентрації подвійного лінійного масиву складається з 10 елементів (рис. 2.2).

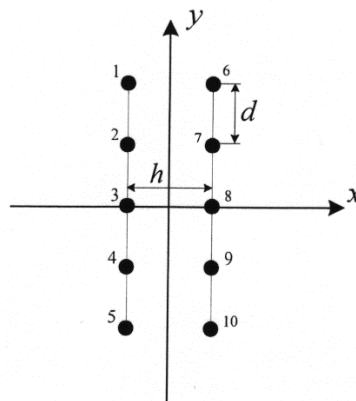


Рис. 2.2. Подвійний лінійний масив

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\Delta r_1 = -\frac{h}{2} \sin \theta \cos \varphi + 2d \sin \theta \sin \varphi;$$

$$\Delta r_2 = -\frac{h}{2} \sin \theta \cos \varphi + d \sin \theta \sin \varphi;$$

$$\Delta r_3 = -\frac{h}{2} \sin \theta \cos \varphi;$$

$$\Delta r_4 = -\frac{h}{2} \sin \theta \cos \varphi - d \sin \theta \sin \varphi;$$

$$\Delta r_5 = -\frac{h}{2} \sin \theta \cos \varphi - 2d \sin \theta \sin \varphi;$$

$$\Delta r_6 = -\Delta r_5; \quad \Delta r_7 = -\Delta r_4; \quad \Delta r_8 = -\Delta r_3; \quad \Delta r_9 = -\Delta r_2; \quad \Delta r_{10} = -\Delta r_1,$$

Підставляємо ці величини в формулу (1.12) і групуємо за допомогою формули Ейлера:  $e^{i\alpha} + e^{-i\alpha} = 2\cos\alpha$ , а також:  $\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta) = 2\cos\alpha\cos\beta$ .

Отримуємо вираз для характеристики спрямованості:

$$\begin{aligned} D(\theta, \varphi) &= \frac{1}{10} \left[ e^{-ik\Delta r_1} + e^{-ik\Delta r_2} + e^{-ik\Delta r_3} + e^{-ik\Delta r_4} + e^{-ik\Delta r_5} + e^{-ik\Delta r_6} + \right. \\ &+ e^{-ik\Delta r_7} + e^{-ik\Delta r_8} + e^{-ik\Delta r_9} + e^{-ik\Delta r_{10}} \left. \right] = \frac{1}{10} \left[ 2\cos(k\Delta r_1) + 2\cos(k\Delta r_2) + 2\cos(k\Delta r_3) + \right. \\ &+ 2\cos(k\Delta r_4) + 2\cos(k\Delta r_5) \left. \right] = \frac{1}{5} \left[ \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi - 2kd\sin\theta\sin\varphi\right) + \right. \\ &+ \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi - kd\sin\theta\sin\varphi\right) + \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi\right) + \\ &+ \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi + kd\sin\theta\sin\varphi\right) + \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi + 2kd\sin\theta\sin\varphi\right) \left. \right] = \\ &= \frac{1}{5} \left[ \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi\right) + 2\cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi\right)\cos(2kd\sin\theta\sin\varphi) + \right. \\ &+ 2\cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi\right)\cos(kd\sin\theta\sin\varphi) \left. \right] = \frac{1}{5} \cos\left(k\frac{h}{2}\sin\theta\cos\varphi\right) \times \\ &\times \left[ 1 + 2\cos(kd\sin\theta\sin\varphi) + 2\cos(2kd\sin\theta\sin\varphi) \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

В горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^\circ$

$$D(\theta, 0) = \cos\left(\frac{\pi fh}{c} \sin\theta\right) \quad (2.2)$$

В вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 0) = \frac{1}{5} \left[ 1 + 2 \cos \left( \frac{2\pi fd}{c} \sin \theta \right) + 2 \cos \left( \frac{4\pi fd}{c} \sin \theta \right) \right] \quad (2.3)$$

Прийmemo значення  $d = 0,2$

На рис. 2.3 представлені діаграми спрямованості подвійного лінійного масиву, побудовані в сферичній системі координат для відстані між лінійками  $h = 0,5d$

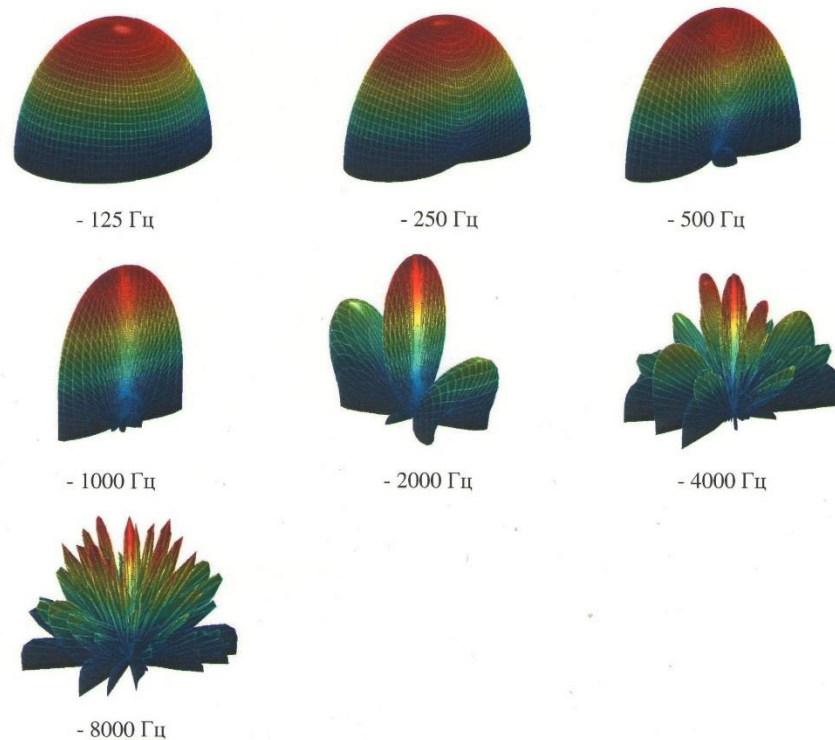


Рис.2.3. Діаграми спрямованості подвійного лінійного масиву при  $h = 0,5d$

У таблиці 2.1 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 в горизонтальній XOZ і вертикальній YOZ площинах для частот 250; 500; 1000 Гц при  $h = 0,5d$ .

Таблиця 2.1.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
XOZ	-	-	120°
YOZ	77°	36°	18°

На рис. 2.4 представлені діаграми спрямованості подвійного лінійного масиву, побудовані в сферичній системі координат для відстані між лінійками  $h = d$ .

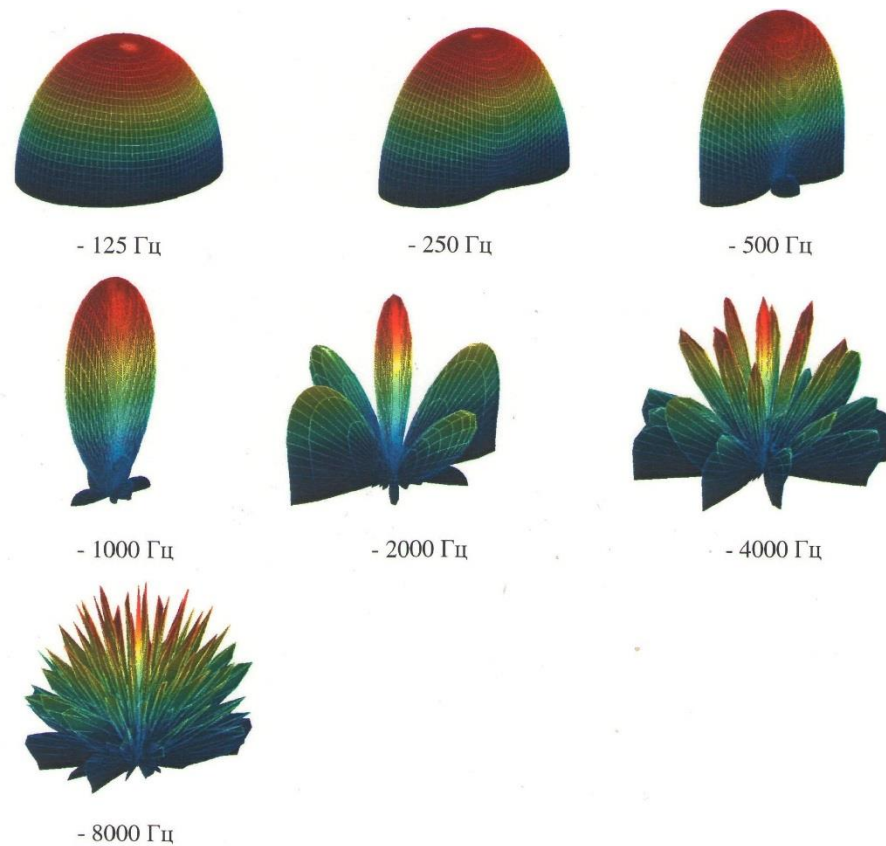


Рис. 2.4. Діаграми спрямованості подвійного лінійного масиву при  $h = d$

У таблиці 2.2 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 в горизонтальній XOZ і вертикальній YOZ площинах для частот 250; 500; 1000 Гц при  $h = d$ .

Таблиця 2.2.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
XOZ	-	120°	51°
YOZ	77°	36°	18°

На рис. 2.5 представлені діаграми спрямованості подвійного лінійного масиву, побудовані в сферичній системі координат для відстані між лінійками  $h = 2d$ .



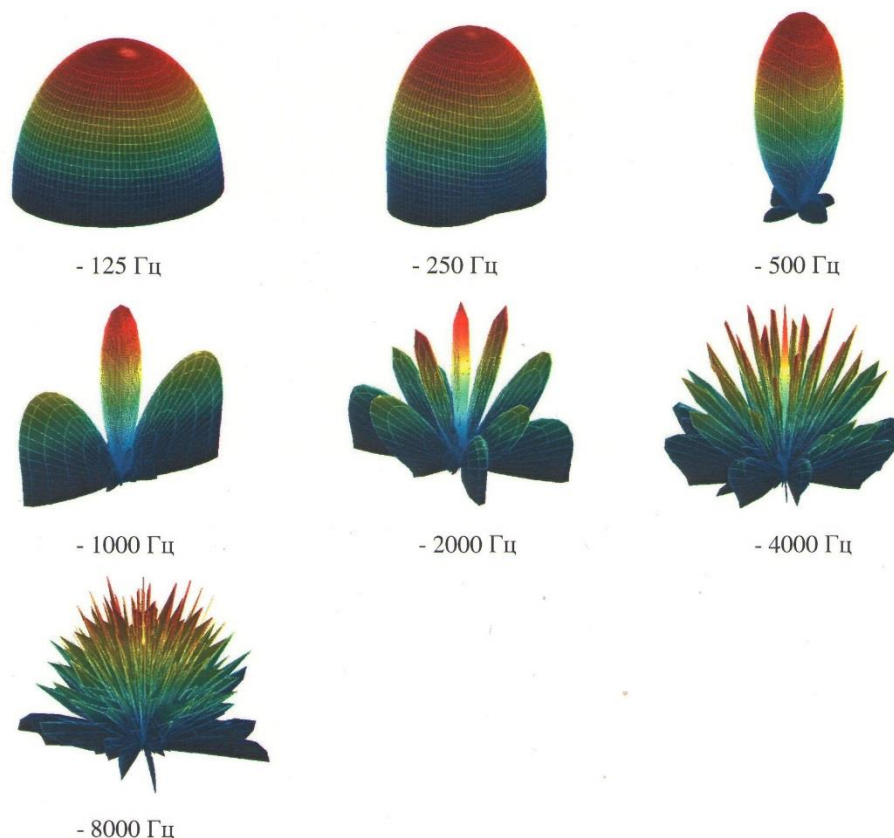


Рис. 2.5. Діаграми спрямованості подвійного лінійного масиву при  $h = 2d$

У таблиці 2.3 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 в горизонтальній  $XOZ$  і вертикальній  $YOZ$  площинах для частот 250; 500; 1000 Гц при  $h = 2d$ .

Таблиця 2.3

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
$XOZ$	$120^\circ$	$51^\circ$	$25^\circ$
$YOZ$	$77^\circ$	$36^\circ$	$18^\circ$

На частоті 125 Гц характеристика спрямованості системи для будь-яких заданих значень  $h$  є практично ненаправленою.

Для  $h = 0,5d; d; 2d$  на частотах 125; 250 Гц спостерігається тільки основний максимум, що загострюється з подальшим зростанням частоти.

Переважний розкривши основного пелюстки спостерігається в горизонтальній площині XOZ, оскільки зі збільшенням частоти кут розкриття у вертикальній площині YOZ зменшується швидше, ніж в горизонтальній XOZ.

Для однієї і тієї ж частоти при зміні відстані  $h$  від  $0,5d$  до  $2d$  зменшується лише кут розкриття в горизонтальній площині XOZ, а у вертикальній YOZ - залишається незмінним.

Для  $h = 0,5d$  додаткові пелюстки з'являються в площині XOZ на частоті 500 Гц; додаткові поодинокі максимуми - в площині YOZ на частоті 2000 Гц.

Для  $h = d$  додаткові пелюстки з'являються в площині YOZ на частоті 500 Гц; додаткові поодинокі максимуми - в обох площинах на частоті 2000 Гц.

Для  $h = 2d$  додаткові пелюстки з'являються в обох площинах на частоті 500 Гц; додаткові поодинокі максимуми - в площині XOZ на частоті 1000 Гц.

З ростом частоти виникає збільшення кількості додаткових лепестків та одиничних максимумів, а також рівня додаткових лепестків.

### 2.3. Розрахунок коефіцієнта осьової концентрації

Коефіцієнт осьової концентрації розглядаємої системи відповідно до формули (1.22) дорівнює:

$$\begin{aligned}
 K &= 10^2 \left\{ 10 + 4 \left( \frac{\sin kd}{kd} + \frac{\sin(2kd)}{2kd} + \frac{\sin(3kd)}{3kd} + \frac{\sin(4kd)}{4kd} + \frac{\sin kh}{kh} + \frac{\sin k\alpha}{k\alpha} + \frac{\sin k\beta}{k\beta} + \frac{\sin k\gamma}{k\gamma} \right. \right. \\
 &+ \left. \frac{\sin k\varphi}{k\varphi} \right) + 4 \left( \frac{2\sin kd}{kd} + \frac{\sin(2kd)}{2kd} + \frac{\sin(3kd)}{3kd} + \frac{2\sin k\alpha}{k\alpha} + \frac{\sin kh}{kh} + \frac{\sin k\beta}{k\beta} + \frac{\sin k\gamma}{k\gamma} \right) + \\
 &+ 2 \left( \frac{2\sin kd}{kd} + \frac{\sin(2kd)}{2kd} + \frac{2\sin k\alpha}{k\alpha} + \frac{2\sin k\beta}{k\beta} + \frac{2\sin kh}{kh} \right) \}^{-1} = \\
 &= 100 \left\{ 10 + \frac{10\sin kh}{kh} + \frac{16\sin kd}{kd} + \frac{12\sin(2kd)}{2kd} + \frac{8\sin(3kd)}{3kd} + \frac{4\sin(4kd)}{4kd} + \frac{16\sin k\alpha}{k\alpha} + \right. \\
 &+ \left. \frac{12\sin k\beta}{k\beta} + \frac{8\sin k\gamma}{k\gamma} + \frac{4\sin k\varphi}{k\varphi} \right\}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

де,

$$\alpha = \sqrt{d^2 + h^2}$$

$$\beta = \sqrt{4d^2 + h^2}$$

$$\gamma = \sqrt{9d^2 + h^2}$$

$$\varphi = \sqrt{16d^2 + h^2}$$

На рис. 2.6 представлені розраховані за формулою (2.4) залежності коефіцієнта осьової концентрації (КОК) подвійного лінійного масиву від  $d / \lambda$  для значень  $h = 0,5d; d; 2d$ .

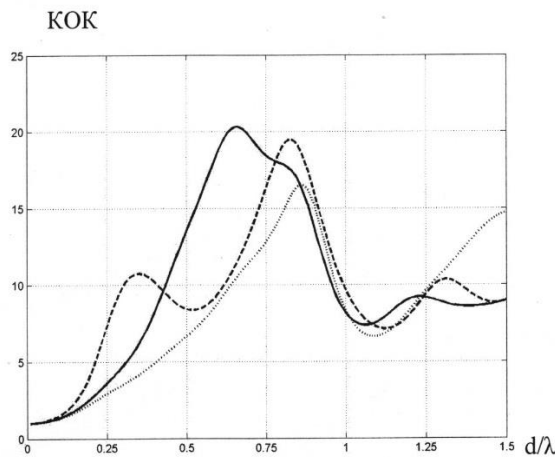


Рис. 2.6. Залежності коефіцієнта осьової концентрації подвійного лінійного масиву від  $d / \lambda$

Відповідні позначення:

- КОК подвійного лінійного масиву при  $h = 0,5d$ ;
- КОК подвійного лінійного масиву при  $h = d$ ;
- ..... КОК подвійного лінійного масиву  $h = 2d$ .

Зі збільшенням відносини  $d / \lambda$  величини коефіцієнтів осьової концентрації зростають, а потім, починаючи з деякого значення  $d / \lambda$ , спадають. Абсолютний максимум спостерігається для системи з параметром  $h = d$ .

У таблиці 2.4 наводяться значення максимумів коефіцієнтів осьової концентрації для подвійного лінійного масиву при відповідних значеннях  $d / \lambda$ .

h	0.5d	d	2d
$d / \lambda$	0.86	0.66	0.83
КОК	16.5	20.5	19.5

На рис. 2.7-2.9 наведені діаграми спрямованості системи в декартовій системі координат для  $h = 0,5d$ ;  $d$ ;  $2d$ .

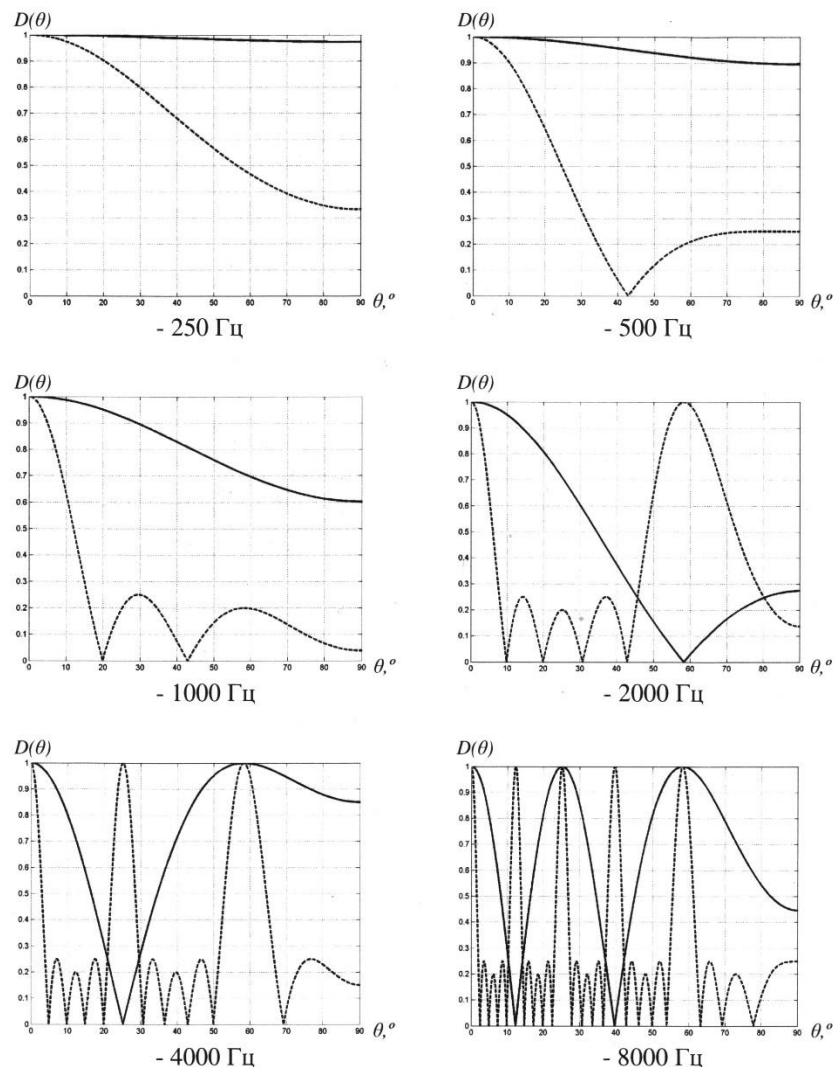


Рис. 2.7. Діаграми напрямленості подвійного лінійного масиву у декардовій системі координат при  $h = 0,5d$

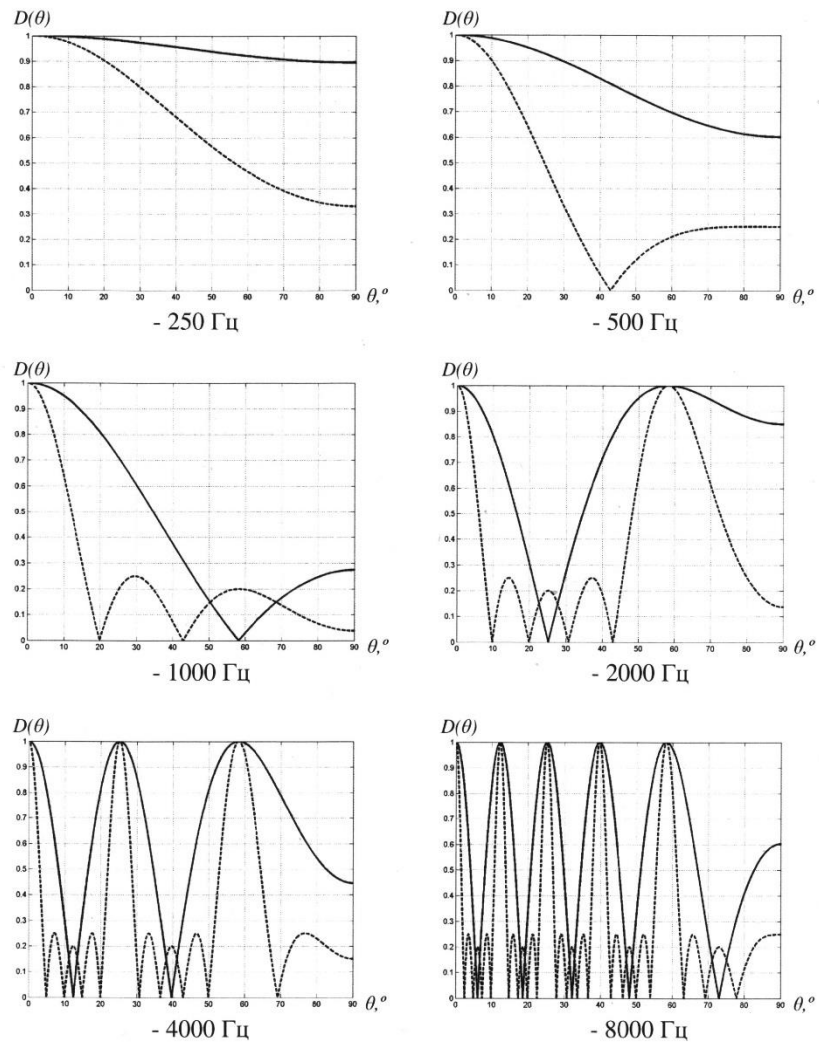


Рис. 2.8. Діаграми напрямленості подвійного лінійного масиву у декардовій системі координат при  $h = d$

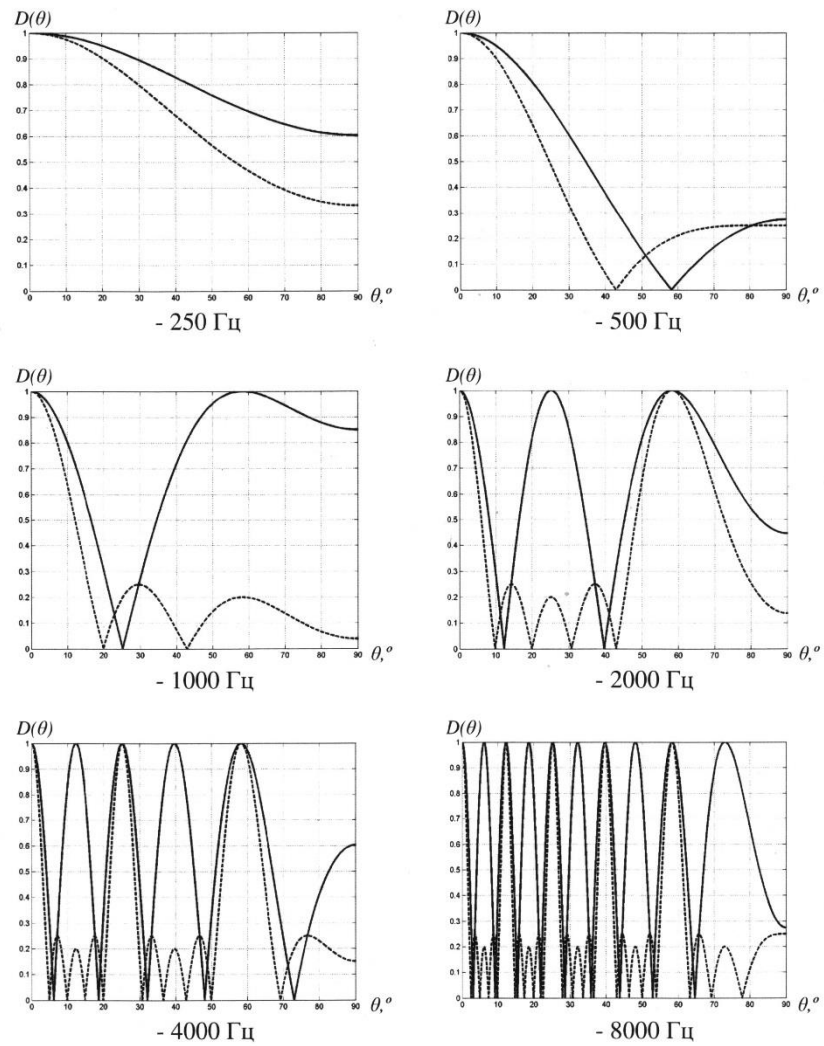


Рис. 2.9. Діаграми напрямленості подвійного лінійного масиву у декардовій системі координат при  $h = 2d$

— Горизонтальна площина XOZ;

--- Вертикальна площина YOZ

## РОДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАНOSTІ СКЛАДНИХ АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ ТИПУ «ХРЕСТ»

### 3.1. Симетричний «хрест»

#### Система типу «хрест» АА

Розглянемо характеристику спрямованості на середньотавних частотах, а також коефіцієнт осьової концентрації системи типу «хрест» АА, що складається з 5 елементів (рис. 3.1).

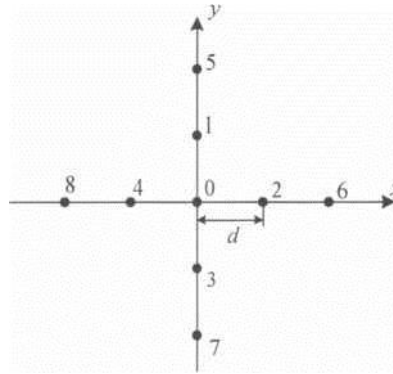


Рис. 3.1. Система типу «хрест» АА

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\Delta r_0 = \bar{p}_0 \bar{u} = 0$$

$$\Delta r_1 = \bar{p}_1 \bar{u} = d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_2 = \bar{p}_2 \bar{u} = d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_3 = \bar{p}_3 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_4 = \bar{p}_4 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi$$

Вираз для характеристики спрямованості:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{5} [1 + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi)] \quad (3.1)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 90^\circ) = \frac{1}{5} [3 + 2 \cos(kd \sin \theta)] \quad (3.2)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^0$

$$D(\theta, 0^0) = \frac{1}{5}[3 + 2\cos(kd \sin \theta)] \quad (3.3)$$

Приймаємо значення  $d=0,2$  м.

На рис. 3.2 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» АА в сферичній системі координат.

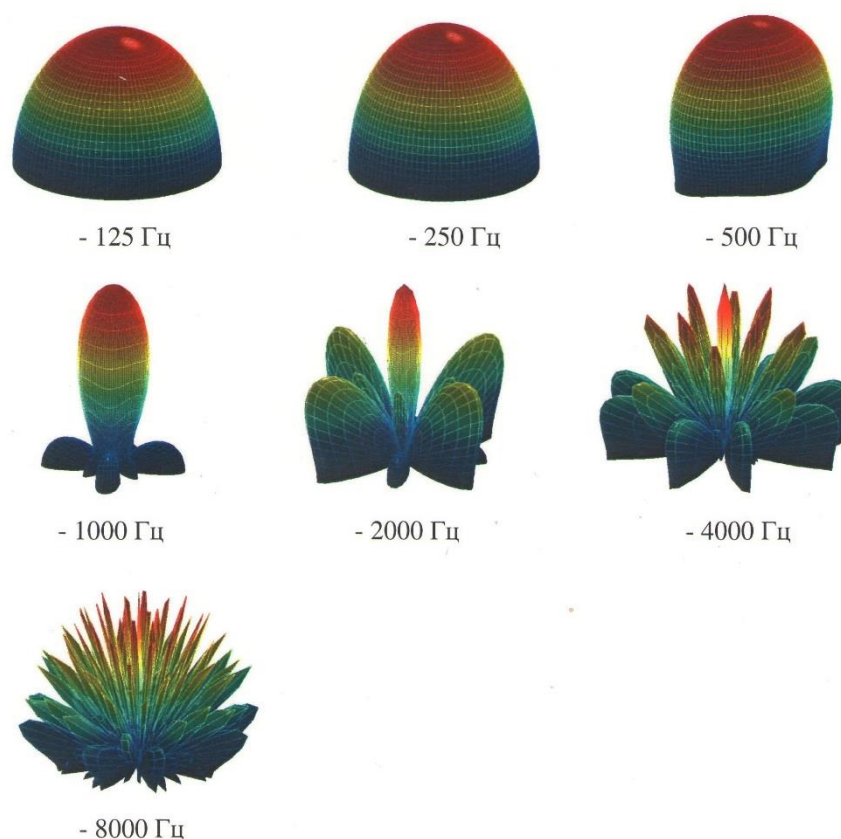


Рис. 3.2. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» АА в сферичній системі координат

У таблиці 3.1 представлені значення кутів розкриву основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» АА.

Таблиця 3.1.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
АА (5 елементів)	-	$90^0$	$42^0$



### Система типу «хрест» АВ

Розглянемо характеристику спрямованості на середнеоктавних частотах, а також коефіцієнт осової концентрації системи типу «хрест» АВ, що складається із 9 елементів (рис. 3.3).

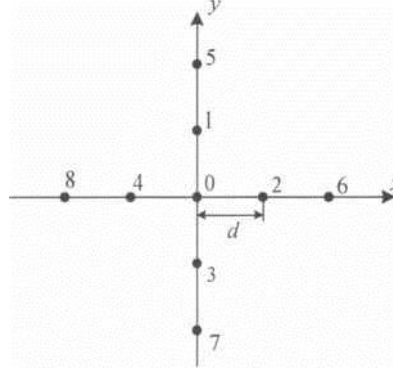


Рис. 3.3. Система типу «хрест» АВ

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\begin{aligned}\Delta r_0 &= \bar{p}_0 \bar{u} = 0 \\ \Delta r_1 &= \bar{p}_1 \bar{u} = d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_2 &= \bar{p}_2 \bar{u} = d \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_3 &= \bar{p}_3 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_4 &= \bar{p}_4 \bar{u} = -d \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_5 &= \bar{p}_5 \bar{u} = 2d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_6 &= \bar{p}_6 \bar{u} = 2d \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_7 &= \bar{p}_7 \bar{u} = -2d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_8 &= \bar{p}_8 \bar{u} = -2d \sin \theta \cos \varphi\end{aligned}$$

Вираз для характеристики спрямованості

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{9} [1 + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi) + 2 \cos(2kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(2kd \sin \theta \cos \varphi)] \quad (3.4)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^\circ$

$$D(\theta, 0^\circ) = \frac{1}{9} [5 + 2 \cos(kd \sin \theta) + 2 \cos(2kd \sin \theta)] \quad (3.5)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 90^\circ) = \frac{1}{9} [5 + 2 \cos(kd \sin \theta) + 2 \cos(2kd \sin \theta)] \quad (3.6)$$

На рис. 3.4 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» АВ в сферичній системі координат.

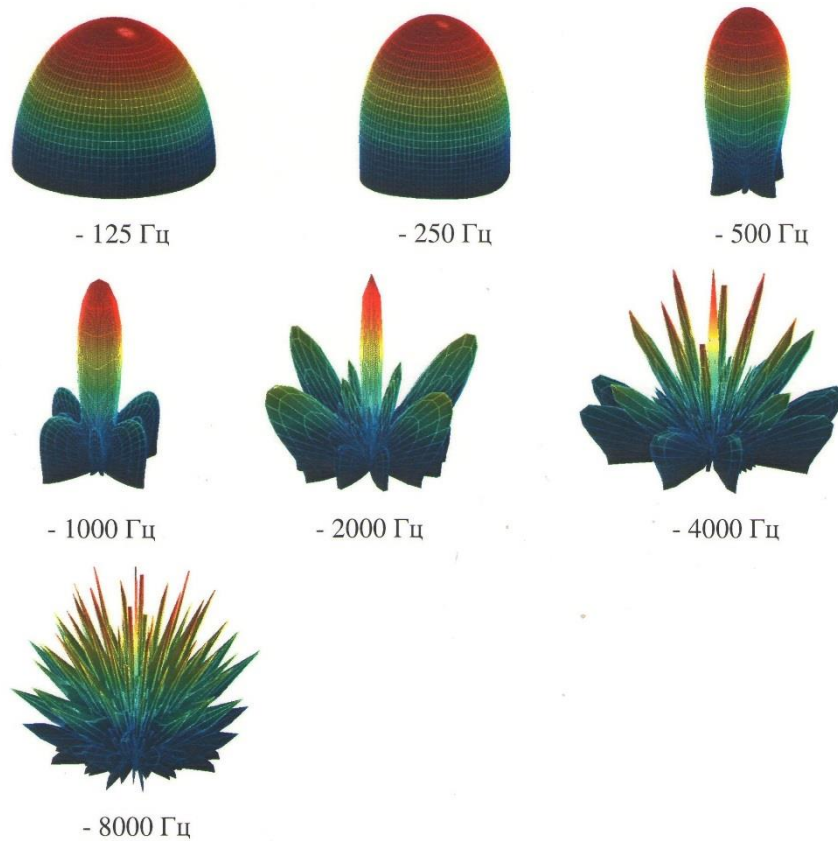


Рис. 3.4. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» АВ в сферичній системі координат

У таблиці 3.2 представлені значення кутів розкриву основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» АВ.

Таблиця 3.2.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
АВ (9 елементів)	122 <sup>0</sup>	52 <sup>0</sup>	25 <sup>0</sup>

### Система типу «хрест» АС

Розглянемо характеристику спрямованості на середньооктавних частотах, коефіцієнт осової концентрації системи типу «хрест» АС, що складається із 13 елементів (рис. 3.5).

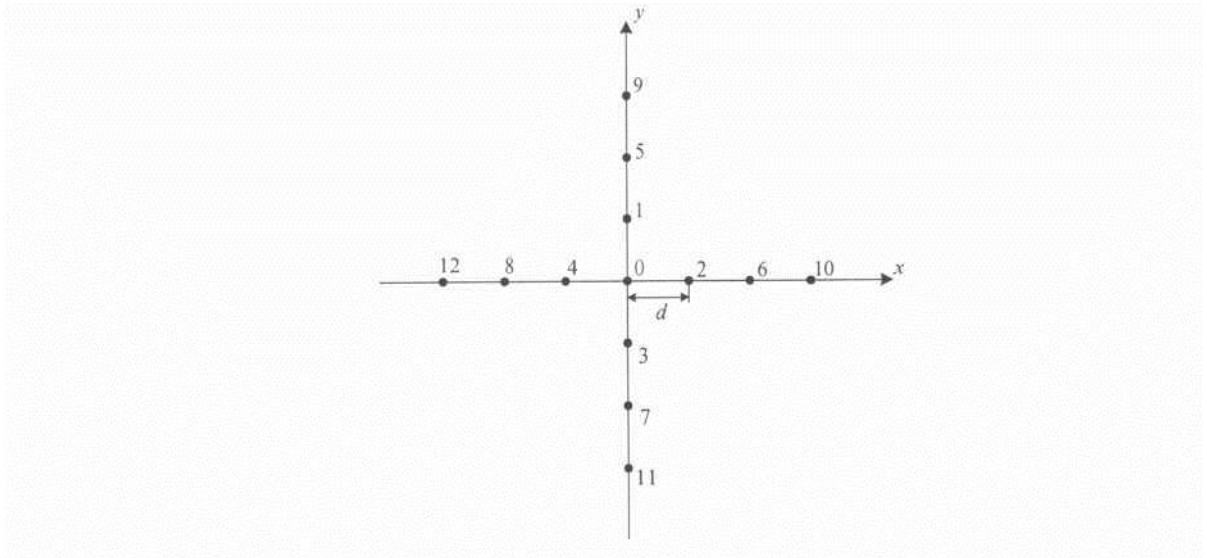


Рис. 3.5. Система типу «хрест» АС

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\Delta r_0 = \bar{p}_0 \bar{u} = 0$$

$$\Delta r_1 = \bar{p}_1 \bar{u} = d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_2 = \bar{p}_2 \bar{u} = d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_3 = \bar{p}_3 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_4 = \bar{p}_4 \bar{u} = -d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_5 = \bar{p}_5 \bar{u} = 2d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_6 = \bar{p}_6 \bar{u} = 2d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_7 = \bar{p}_7 \bar{u} = -2d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_8 = \bar{p}_8 \bar{u} = -2d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_9 = \bar{p}_9 \bar{u} = 3d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_{10} = \bar{p}_{10} \bar{u} = -3d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_{11} = \bar{p}_{11} \bar{u} = 3d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_{12} = \bar{p}_{12} \bar{u} = -3d \sin \theta \cos \varphi$$

Вираз для характеристики спрямованості:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{13} [1 + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi) + 2 \cos(2kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(2kd \sin \theta \cos \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi)] \quad (3.7)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^\circ$

$$D(\theta, 0^\circ) = \frac{1}{13} [7 + 2 \cos(kd \sin \theta) + 2 \cos(2kd \sin \theta) + 2 \cos(3kd \sin \theta)] \quad (3.8)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 90^\circ) = \frac{1}{13} [7 + 2 \cos(kd \sin \theta) + 2 \cos(2kd \sin \theta) + 2 \cos(3kd \sin \theta)] \quad (3.9)$$

Приймаємо значення  $d = 0,2$  м.

На рис. 3.6 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» АС в сферичній системі координат.

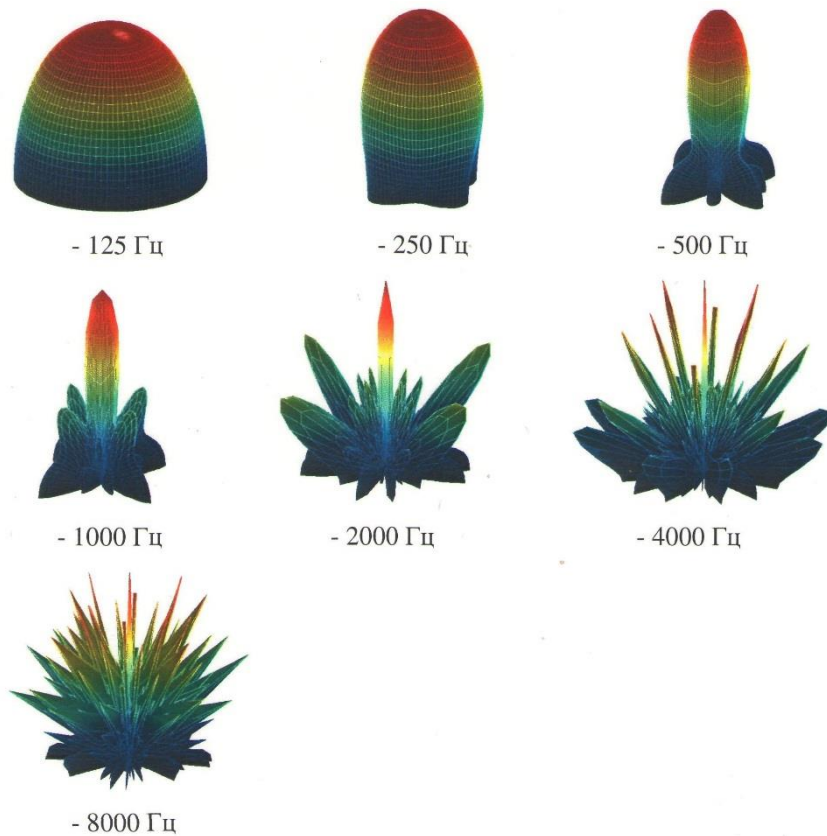


Рис. 3.6 Діаграми спрямованості системи типу «хрест» АС в сферичній системі координат

У таблиці 3.3 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» АС.

Таблиця 3.3.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
АС (13 елементів)	$78^0$	$37^0$	$18^0$

На рис. 3.7 наведені дпорівняльні характеристики діаграм спрямованості систем типу «хрест»: АА, АВ та АС в декартовій системі координат.

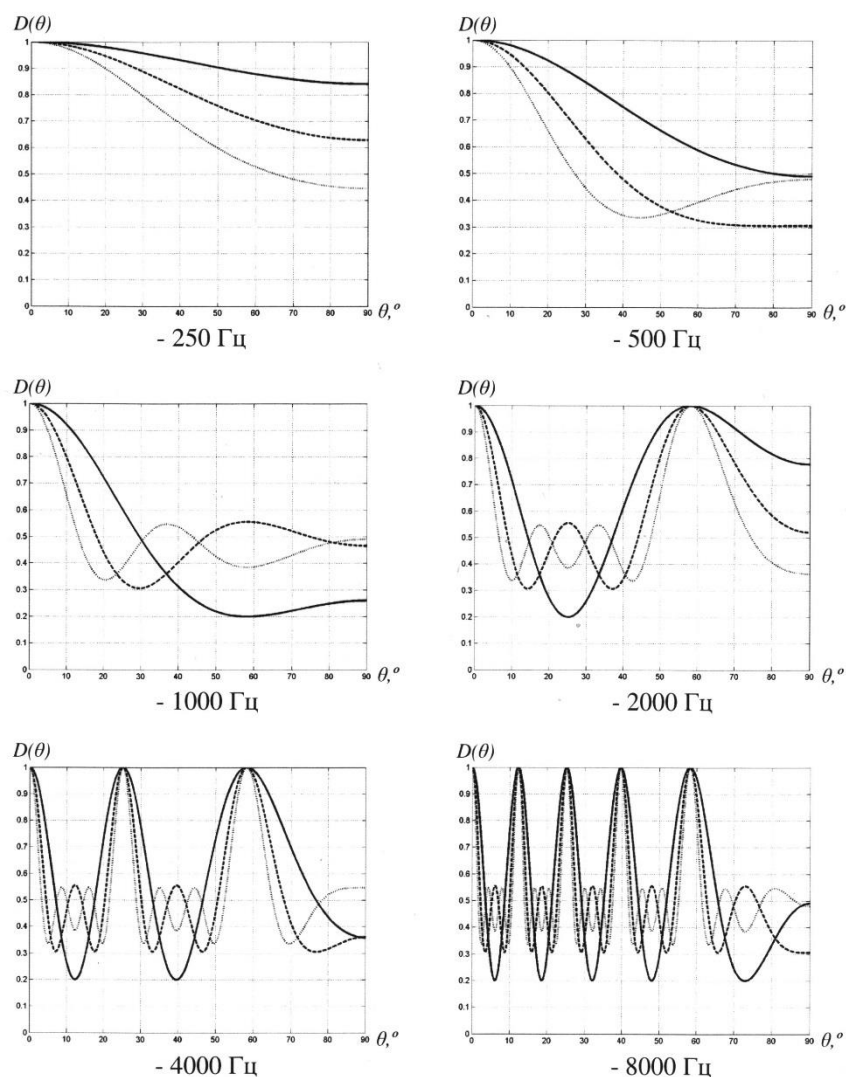


Рис. 3.7. Діаграми направленності системи типу «хрест» АА, АВ, Ас у декардовій системі координат

- система АА (5 елементів);
- система АВ (9 елементів);
- ..... система АС (13 елементів).

На частоті 125 Гц характеристики спрямованості системи симетричного хреста при різній кількості елементів є практично ненаправленими.

На частоті 250 Гц у всіх системах присутній тільки головний максимум, що загострюється при подальшому зростанні частоти. Причому зменшення кута розкриву основної пелюстки і в горизонтальній, і у вертикальній площинах відбувається однаково. Тому характеристика спрямованості має практично круглу форму в розрізі паралельному площині ХОУ (площині випромінювачів).

Для одного і того ж значення частоти при збільшенні кількості елементів також відбувається зменшення кута основного пелюстки.

Для системи АС (13 елементів) на частоті 500 Гц, а для систем АА (5 елементів) і АВ (9 елементів) з певного значення кута відбувається збільшення характеристики спрямованості.

На частоті 2000 Гц для всіх систем з'являються додаткові поодинокі максимуми при одному і тому ж значенні кута  $\theta=58,2^\circ$ . Також на цій частоті для системи АС крім одиничного додаткового максимуму спостерігаються ще два однакових додаткових (але менших) підйому характеристики спрямованості, для системи АВ - тільки один. При подальшому зростанні частоти вони звужуються і збільшується їх кількість, але рівень - залишається постійним.

Також з ростом частоти відбувається збільшення кількості одиничних додаткових максимумів для всіх систем. Причому для однакових частот максимуми додаткових одиничних пелюсток для всіх систем спостерігаються для одних і тих же значень кута  $\theta$ , утворюючи ряд значень:

- 2000 Гц:  $58,2^\circ$ ;
- 4000 Гц:  $25,15^\circ$ ;  $58,2^\circ$ ;
- 8000 Гц:  $12,27^\circ$ ;  $25,15^\circ$ ;  $39,6^\circ$ ;  $58,2^\circ$ .

Коефіцієнт осьової концентрації даної системи відповідно до формули (1.22) дорівнює для системи АА (5 елементів):

$$K = 25 \left\{ 5 + \frac{8 \sin kd}{kd} + \frac{8 \sin(kd\sqrt{2})}{kd\sqrt{2}} + \frac{4 \sin 2kd}{2kd} \right\}^{-1} \quad (3.10)$$

для системи АВ (9 елементів )

$$K = 81 \left\{ 9 + \frac{16 \sin kd}{kd} + \frac{12 \sin 2kd}{2kd} + \frac{8 \sin 3kd}{3kd} + \frac{4 \sin 4kd}{4kd} + \frac{16 \sin(2kd\sqrt{2})}{2kd\sqrt{2}} + \frac{16 \sin(kd\sqrt{5})}{kd\sqrt{5}} \right\}^{-1} \quad (3.11)$$

для системи АС (13 елементів )

$$K = 169 \left\{ 13 + \frac{24 \sin kd}{kd} + \frac{20 \sin 2kd}{2kd} + \frac{16 \sin 3kd}{3kd} + \frac{12 \sin 4kd}{4kd} + \frac{8 \sin 5kd}{5kd} + \frac{4 \sin 6kd}{6kd} + \frac{8 \sin(kd\sqrt{2})}{kd\sqrt{2}} + \frac{16 \sin(kd\sqrt{5})}{kd\sqrt{5}} + \frac{16 \sin(kd\sqrt{10})}{kd\sqrt{10}} + \frac{16 \sin(kd\sqrt{13})}{kd\sqrt{13}} + \frac{8 \sin(2kd\sqrt{2})}{2kd\sqrt{2}} + \frac{8 \sin(3kd\sqrt{2})}{3kd\sqrt{2}} \right\}^{-1} \quad (3.12)$$

На рис. 3.8 представлені залежності коефіцієнта осьової концентрації (КОК) систем типу «хрест» від  $d/\lambda$  при різній кількості елементів.

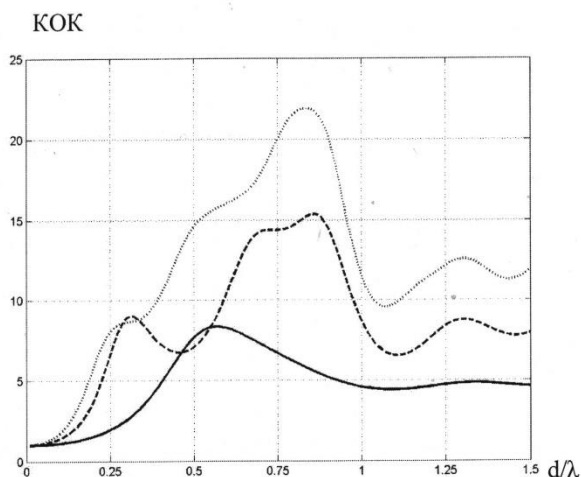


Рис. 3.8. Залежності коефіцієнта осьової концентрації системи типу «хрест» АА, АВ, АС від  $d/\lambda$

Відповідно:

— КОК для системи типу «хрест» АА (5 елементів);

--- КОК для системи типу «хрест» АВ (9 елементів);

..... КОК для системи типу «хрест» АС (13 елементів).

При збільшенні кількості елементів значення максимуму КОК збільшується. Абсолютний максимум коефіцієнта осьової концентрації спостерігається для системи АС.

У таблиці 3.4 наводяться значення максимумів коефіцієнтів осьової концентрації для систем типу «хрест» при відповідних значеннях  $d / \lambda$ .

Таблиця 3.4.

	АА(5 елементів)	АВ (9 елементів)	АС (13 елементів )
$d / \lambda$	0.57	0.86	0.83
КОК	8.3	15.4	21.9

### 3.2. Несиметричний «хрест»

#### 3.2.1. «Хрест» з різною кількістю елементів в гілках

##### Система типу «хрест» ВА

Розглянемо характеристику спрямованості на середнеоктавних частотах, а також коефіцієнт осьової концентрації системи типу «хрест» ВА, що складається з 7 елементів (рис. 3.9).

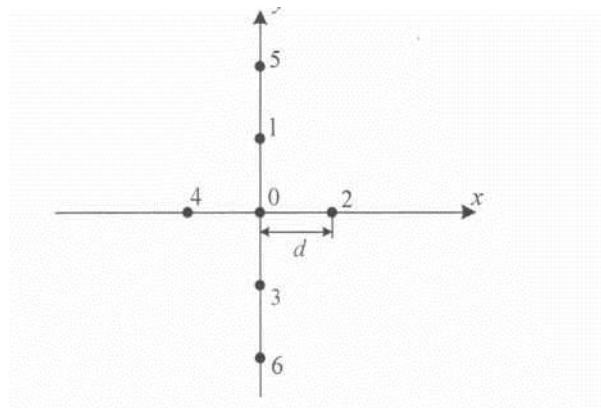


Рис. 3.9. Система типу «хрест» ВА

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіги фази, у відповідності до формули (1.13):

$$\Delta r_1 = \bar{p}_1 \bar{u} = d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_2 = \bar{p}_2 \bar{u} = d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_3 = \bar{p}_3 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_4 = \bar{p}_4 \bar{u} = -d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_5 = \bar{p}_5 \bar{u} = 2d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_6 = \bar{p}_6 \bar{u} = -2d \sin \theta \sin \varphi$$



Вираз для характеристики спрямованості:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{13} [1 + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi) + 2 \cos(2kd \sin \theta \sin \varphi)] \quad (3.13)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^\circ$

$$D(\theta, 0^\circ) = \frac{1}{7} [5 + 2 \cos(kd \sin \theta)] \quad (3.14)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 90^\circ) = \frac{1}{7} [3 + 2 \cos(kd \sin \theta) + 2 \cos(2kd \sin \theta)] \quad (3.15)$$

Приймаємо значення  $d=0,2$  м.

На рис. 3.10 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВА в сферичній системі координат.

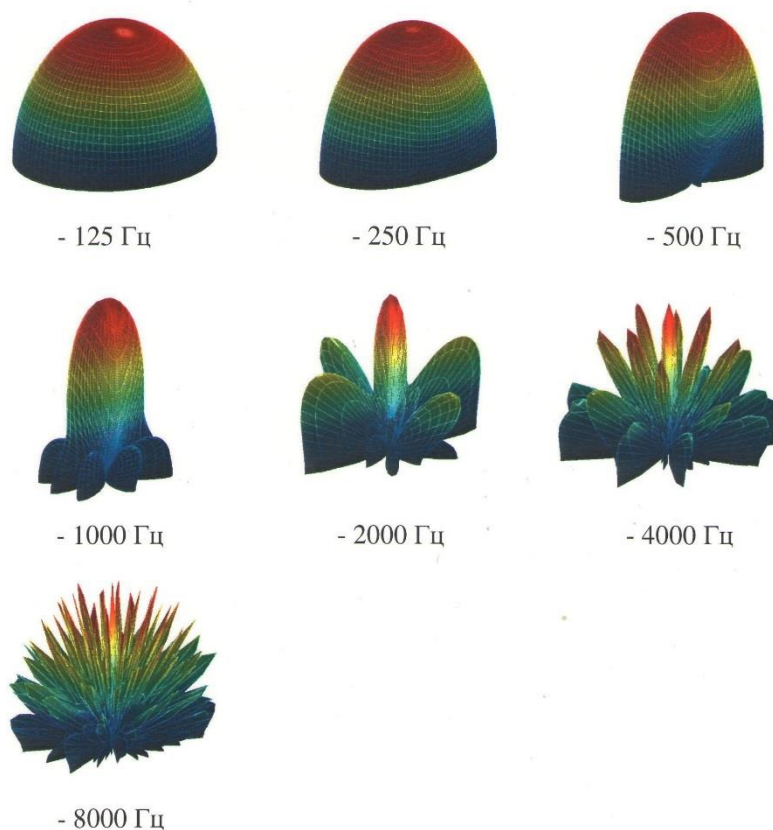


Рис. 3.10 Діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВА в сферичній системі координат

У таблиці 3.5 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» ВА.

Таблиця 3.5.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
XOZ	-	$123^0$	$52^0$
YOZ	$97^0$	$44^0$	$22^0$

На рис. 3.11 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВА в декартовій системі координат.

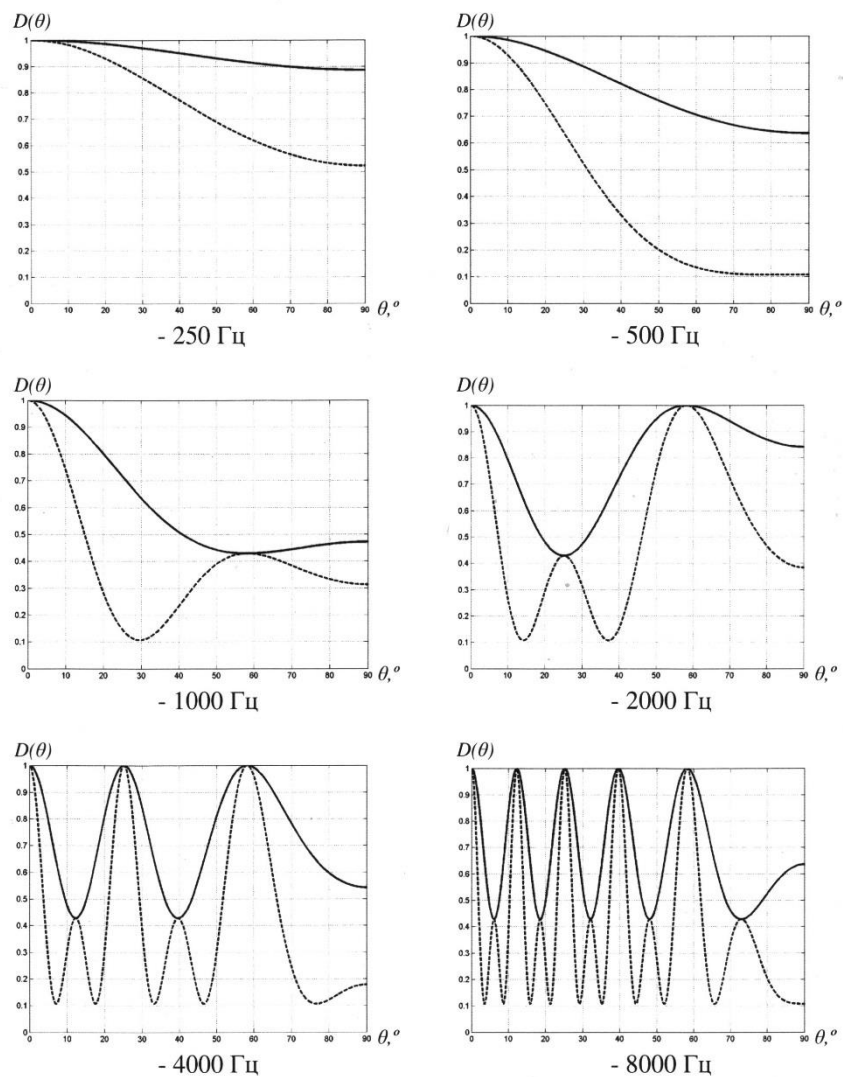


Рис. 3.11. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВА в декартовій системі координат: — горизонтальна площина XOZ; --- вертикальна площина YOZ

На частоті 125 Гц характеристика спрямованості систем ВА є практично ненаправленою.

На частотах 125; 250 і 500 Гц присутній тільки головний максимум, який звужується зі збільшенням частоти. З ростом частоти ширина основної пелюстки зменшується швидше у вертикальній площині YOZ, ніж в горизонтальній XOZ. Тому основний пелюстка має переважно розкрити в горизонтальній площині.

На частоті 1000 Гц при певному значенні кута  $\theta$  відбувається збільшення рівня характеристики спрямованості в обох площинах.

На частоті 2000 Гц і в площині XOZ, і в площині YOZ з'являється додатковий одиничний максимум при однаковому значенні кута  $\theta=58,2^\circ$ .

При подальшому збільшенні частоти кількість додаткових максимумів збільшується, причому їх поява відбувається на таких же значеннях кута  $\theta$ , як і для симетричного хреста для відповідних частот.

### **Система типу «хрест» ВВ**

Розглянемо характеристику спрямованості на среднеоктавних частотах, коефіцієнт осової концентрації системи типу «хрест» ВВ, що складається з 9 елементів (рис. 3.12).

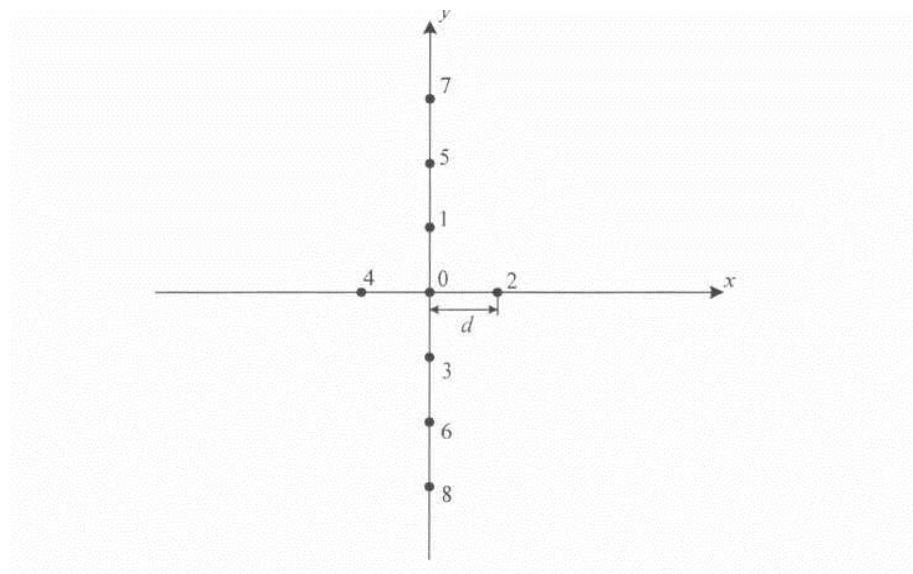


Рис. 3.12. Система типу «хрест» ВВ

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\begin{aligned}\Delta r_1 &= \bar{p}_1 \bar{u} = d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_2 &= \bar{p}_2 \bar{u} = d \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_3 &= \bar{p}_3 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_4 &= \bar{p}_4 \bar{u} = -d \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_5 &= \bar{p}_5 \bar{u} = 2d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_6 &= \bar{p}_6 \bar{u} = -2d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_7 &= \bar{p}_7 \bar{u} = 3d \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_8 &= \bar{p}_8 \bar{u} = -3d \sin \theta \sin \varphi\end{aligned}$$

Вираз для характеристики спрямованості:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{9} [1 + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi) + 2 \cos(2kd \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(3kd \sin \theta \sin \varphi)] \quad (3.16)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^0$

$$D(\theta, 0^0) = \frac{1}{9} [7 + 2 \cos(kd \sin \theta)] \quad (3.17)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^0$

$$D(\theta, 90^0) = \frac{1}{9} [3 + 2 \cos(kd \sin \theta) + 2 \cos(2kd \sin \theta) + 2 \cos(3kd \sin \theta)] \quad (3.18)$$

Приймаємо значення  $d = 0,2$  м.

На рис. 3.13 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВВ в сферичній системі координат.

На рис. 3.14 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВВ в декартовій системі координат.

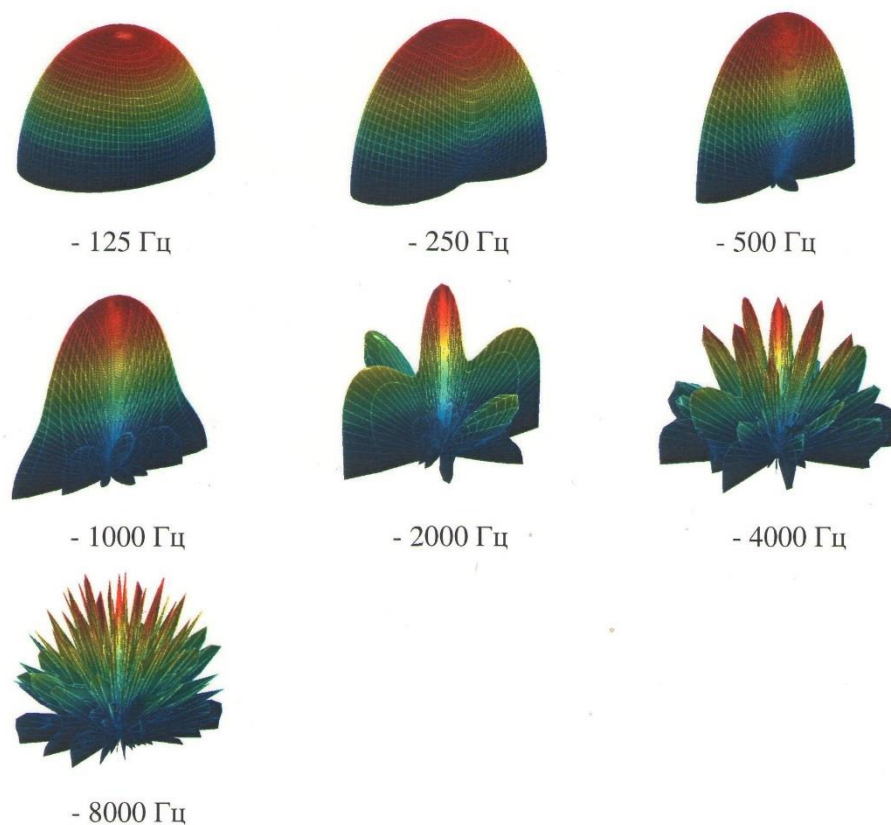


Рис. 3.13. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВВ в сферичній системі координат

У таблиці 3.6 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» ВВ.

Таблиця 3.6.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
XOZ	-	-	$63^0$
YOZ	$88^0$	$41^0$	$20^0$

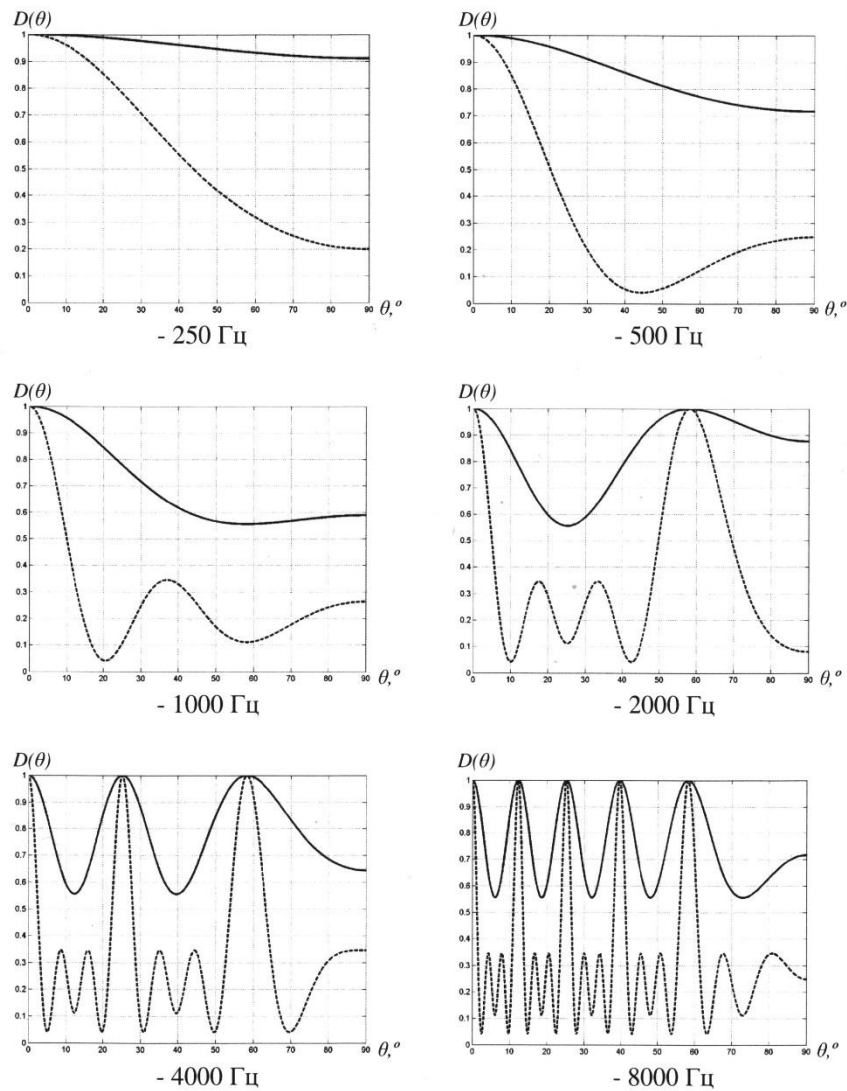


Рис. 3.14 Діаграми спрямованості системи типу «хрест» ВВ в декартовій системі координат: — горизонтальна площина XOZ; --- вертикальна площина YOZ

На частоті 125 Гц характеристика спрямованості системи ВВ є практично ненаправленою.

На частотах 125; 250 Гц присутній тільки головний максимум, який звужується зі збільшенням частоти. З ростом частоти ширина основної пелюстки зменшується швидше у вертикальній площині YOZ, ніж в горизонтальній XOZ. Тому основний пелюстка має переважно розкрити в горизонтальній площині.

На частоті 500 Гц для площині XOZ і на 1000 Гц для YOZ при певному значенні кута  $\theta$  відбувається збільшення рівня характеристики спрямованості.

Додаткові поодинокі максимуми з'являються на частоті 2000 Гц, і з ростом частоти відбувається збільшення їх кількості при таких же значеннях кута  $\theta$ , як і для симетричного хреста.

Коефіцієнт осьової концентрації даної системи відповідно до формули (1.22) дорівнює для системи ВА (7 елементів) для системи ВВ (9 елементів):

$$K = 49 \left\{ 7 + \frac{12 \sin kd}{kd} + \frac{8 \sin 2kd}{2kd} + \frac{4 \sin 3kd}{3kd} + \frac{2 \sin 4kd}{4kd} + \frac{8 \sin(kd\sqrt{2})}{2kd\sqrt{2}} + \frac{8 \sin(kd\sqrt{5})}{kd\sqrt{5}} \right\}^{-1} \quad (3.19)$$

$$K = 81 \left\{ 9 + \frac{16 \sin kd}{kd} + \frac{12 \sin 2kd}{2kd} + \frac{8 \sin 3kd}{3kd} + \frac{6 \sin 4kd}{4kd} + \frac{4 \sin 5kd}{5kd} + \frac{2 \sin 6kd}{6kd} + \frac{8 \sin(kd\sqrt{2})}{kd\sqrt{2}} + \frac{8 \sin(kd\sqrt{5})}{kd\sqrt{5}} \right\}^{-1} \quad (3.20)$$

На рис. 3.15 представлені залежності коефіцієнта осьової концентрації (КОК) систем типу «хрест» ВА і ВВ від  $d/\lambda$

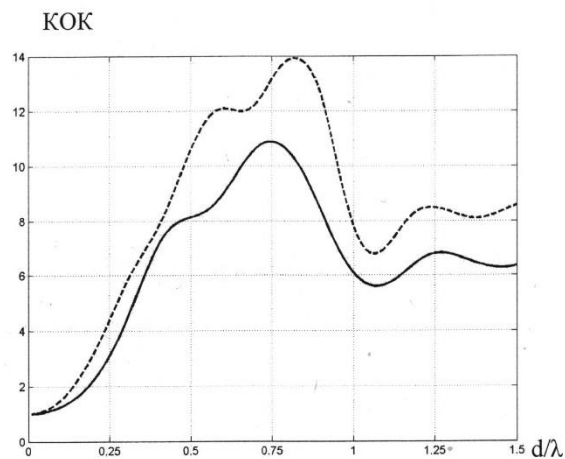


Рис. 3.15. Залежності коефіцієнта осьової концентрації систем типу «хрест» ВА і ВВ від  $d/\lambda$

Відповідно:

— КОК для системи типу «хрест» ВА (7 елементів);

---КОК для системи типу «хрест» ВВ (9 елементів).

Зі збільшенням відносини  $d/\lambda$  величина КОК спочатку зростає, а потім, починаючи з деякого значення  $d/\lambda$  тим більшого, чим більше кількість елементів,

спостерігається падіння коефіцієнта осьової концентрації. Абсолютний максимум КОК спостерігається для системи ВВ (9 елементів).

У таблиці 3.7 наводяться значення максимумів коефіцієнтів осьової концентрації для систем типу «хрест» при відповідних значеннях  $d / \lambda$ .

Таблиця 3.7

	ВА (7 елементів)	ВВ(7 елементів)
$d / \lambda$	0.74	0.82
КОК	10.9	14

### 3.2.2. «Хрест» з різними відстанями між елементами в гілках

#### Система типу «хрест» СА

Розглянемо характеристику спрямованості на середнеоктавних частотах, коефіцієнт осьової концентрації системи типу «хрест» СА, що складається з 5 елементів (рис. 3.16)

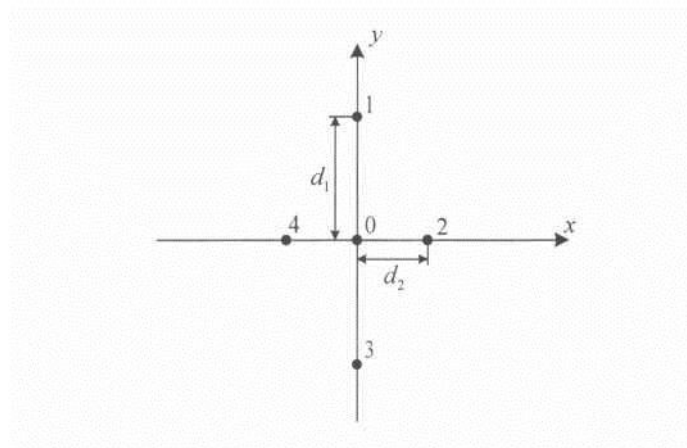


Рис. 3.16. Система типу «хрест» СА

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\Delta r_0 = \bar{p}_0 \bar{u} = 0$$

$$\Delta r_1 = \bar{p}_1 \bar{u} = d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_2 = \bar{p}_2 \bar{u} = d \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Delta r_3 = \bar{p}_3 \bar{u} = -d \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta r_4 = \bar{p}_4 \bar{u} = -d \sin \theta \cos \varphi$$



Вираз для характеристики спрямованості:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{5} [1 + 2 \cos(kd_1 \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd \sin \theta \cos \varphi)] \quad (3.21)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^\circ$

$$D(\theta, 0^\circ) = \frac{1}{5} [3 + 2 \cos(kd_2 \sin \theta)] \quad (3.22)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 90^\circ) = \frac{1}{5} [3 + 2 \cos(kd_1 \sin \theta)] \quad (3.23)$$

Приймаємо значення  $d_1 = 0,4$  м;  $d_2 = 0,2$  м.

На рис. 3.17 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» СА в сферичній системі координат.

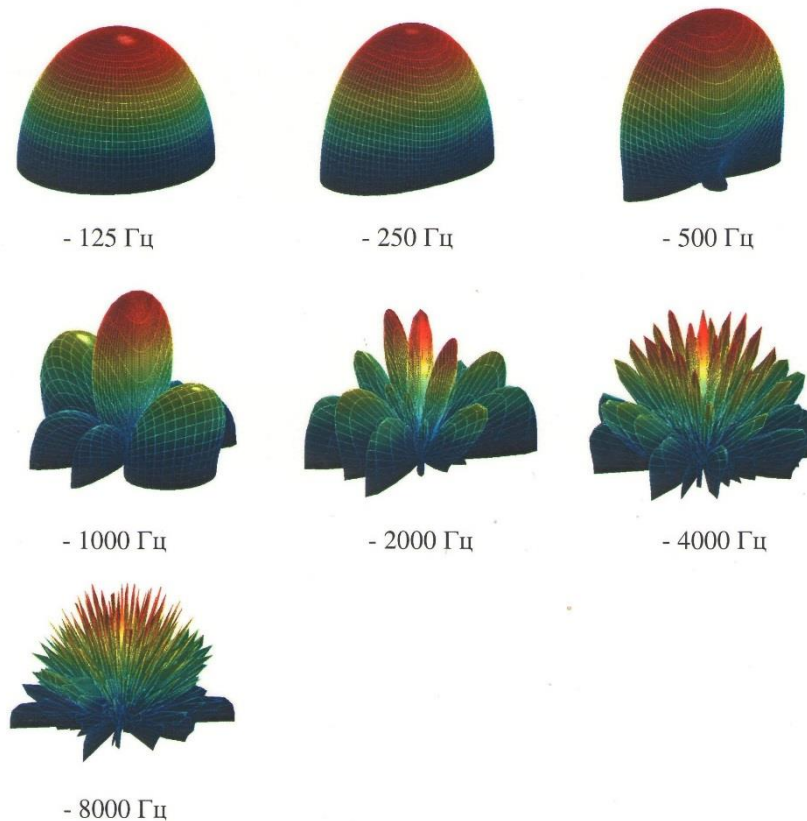


Рис. 3.17 Діаграми спрямованості системи типу «хрест» СА в сферичній системі координат

У таблиці 3.8 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» СА.

Таблиця 3.8.

	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
XOZ	-	$91^{\circ}$	$42^{\circ}$
YOZ	$91^{\circ}$	$42^{\circ}$	$20^{\circ}$

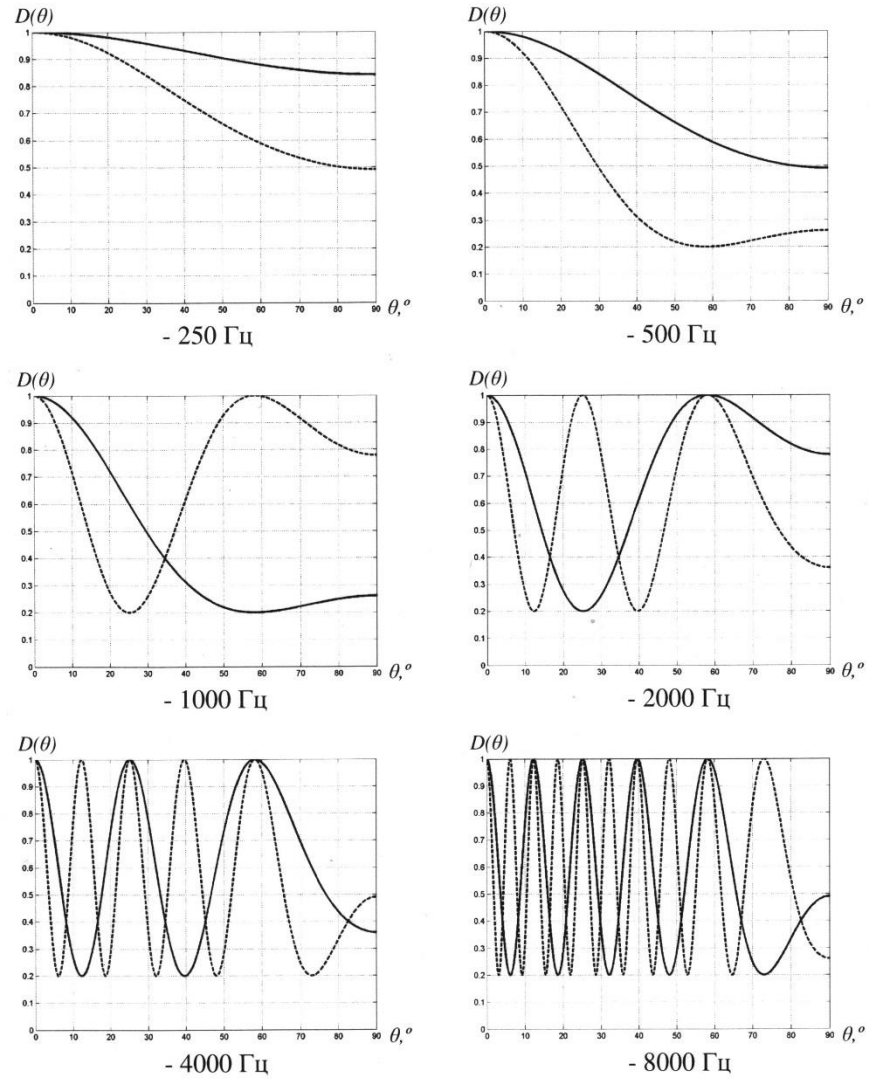


Рис. 3.18. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» СА в декартовій системі координат: — горизонтальна площина XOZ; --- вертикальна площина YOZ

### Система типу «хрест» СВ

Розглянемо характеристику спрямованості на середнеоктавних частотах, коефіцієнт осьової концентрації системи типу «хрест» СВ, що складається з 9 елементів (рис. 3.19).

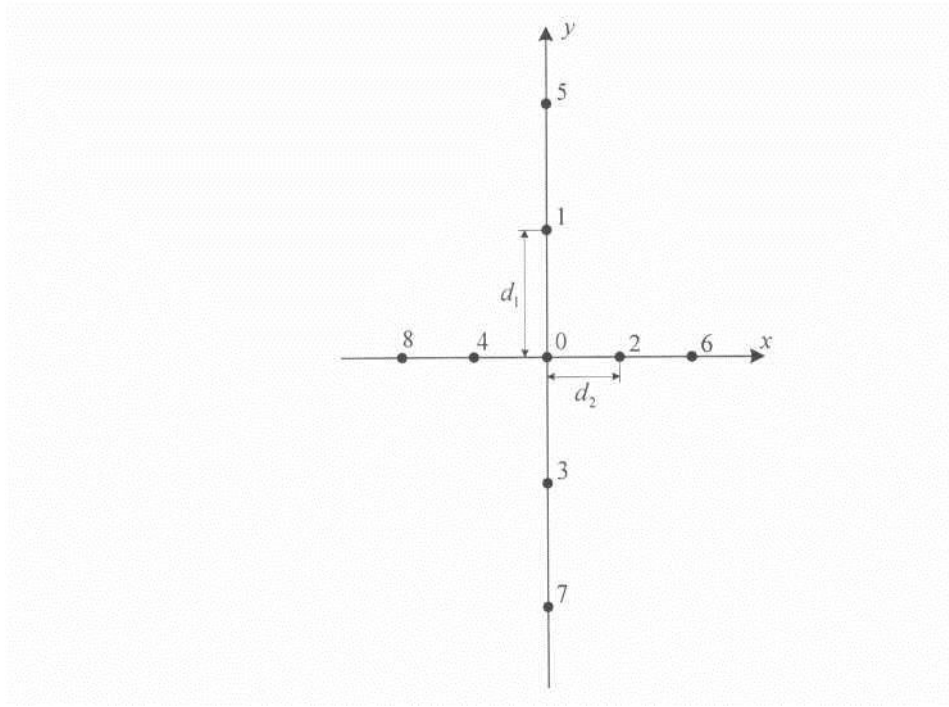


Рис. 3.19. Система типу «хрест» СВ

Скалярні добутки для кожного елемента, що характеризують набіг фази, відповідно до формули (1.13):

$$\begin{aligned}\Delta r_0 &= \bar{p}_0 \bar{u} = 0 \\ \Delta r_1 &= \bar{p}_1 \bar{u} = d_1 \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_2 &= \bar{p}_2 \bar{u} = d_2 \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_3 &= \bar{p}_3 \bar{u} = -d_1 \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_4 &= \bar{p}_4 \bar{u} = -d_2 \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_5 &= \bar{p}_5 \bar{u} = 2d_1 \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_6 &= \bar{p}_6 \bar{u} = 2d_2 \sin \theta \cos \varphi \\ \Delta r_7 &= \bar{p}_7 \bar{u} = -2d_1 \sin \theta \sin \varphi \\ \Delta r_8 &= \bar{p}_8 \bar{u} = -2d_2 \sin \theta \cos \varphi\end{aligned}$$

Вираз для характеристики спрямованості:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{1}{9} [1 + 2 \cos(kd_1 \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(kd_2 \sin \theta \cos \varphi) + 2 \cos(2kd_1 \sin \theta \sin \varphi) + 2 \cos(2kd_2 \sin \theta \cos \varphi)] \quad (3.24)$$

У горизонтальній площині ZOX:  $\varphi = 0^\circ$

$$D(\theta, 0^\circ) = \frac{1}{9} [5 + 2 \cos(kd_2 \sin \theta) + 2 \cos(2kd_2 \sin \theta)] \quad (3.25)$$

У вертикальній площині ZOY:  $\varphi = 90^\circ$

$$D(\theta, 90^\circ) = \frac{1}{9} [5 + 2 \cos(kd_1 \sin \theta) + 2 \cos(2kd_1 \sin \theta)] \quad (3.26)$$

Приймаємо значення  $d_1 = 0,4$  м;  $d_2 = 0,2$  м.

На рис. 3.20 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» СВ в сферичній системі координат.

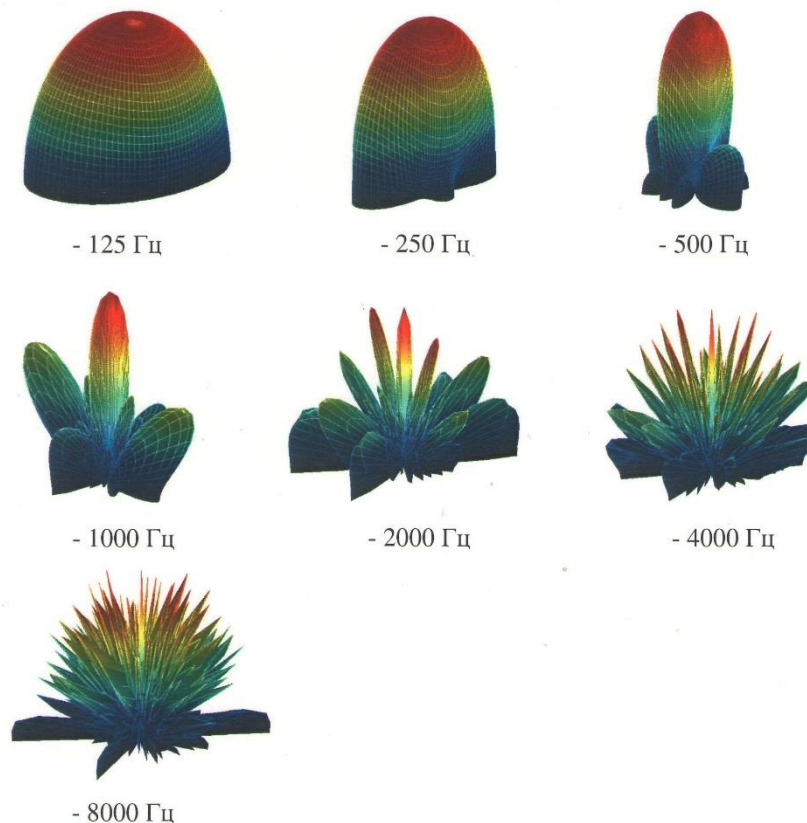


Рис. 3.20. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» СВ в сферичній системі координат

У таблиці 3.9 представлені значення кутів розкриття основної пелюстки на рівні 0,707 для частот 125; 250; 500; 1000 Гц для системи типу «хрест» СА.

Таблиця 3.9.

	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц
XOZ	-	$122^{\circ}$	$52^{\circ}$	$25^{\circ}$
YOZ	$122^{\circ}$	$52^{\circ}$	$25^{\circ}$	$12,6^{\circ}$

На рис. 3.21 наведені діаграми спрямованості системи типу «хрест» СВ в декартовій системі координат.

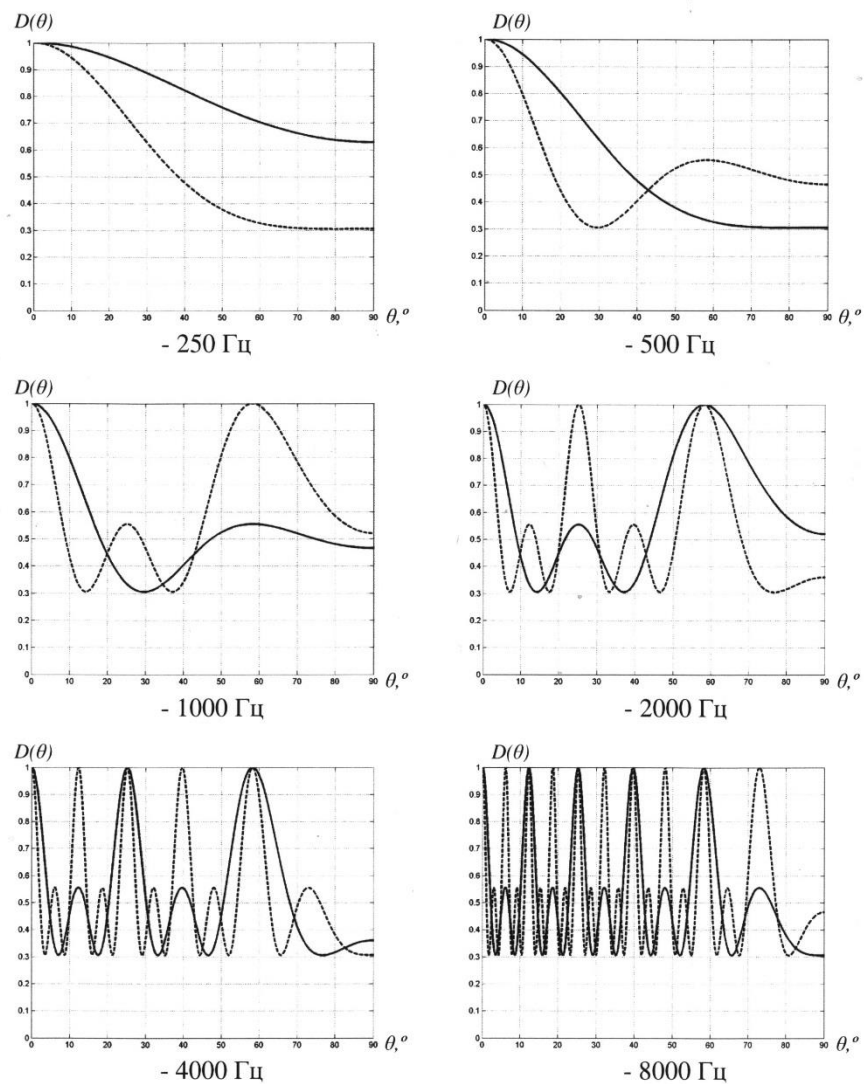


Рис. 3.21. Діаграми спрямованості системи типу «хрест» СВ в декартовій системі координат: — горизонтальна площина XOZ; --- вертикальна площина YOZ

На частоті 125 Гц характеристика спрямованості системи СА є фактично ненаправленою.

При подальшому зростанні частоти відбувається звуження основної пелюстки. Причому кут розкриття головного максимуму в вертикальній площині YOZ зменшується швидше, ніж у вертикальній XOZ, що призводить до розкриття бокової пелюстки в горизонтальній площині.

На частоті 500 Гц у вертикальній площині YOZ при певних значеннях кута  $\theta$  відбувається підйом рівня характеристики спрямованості.

На частоті 1000 Гц в вертикальній площині YOZ з'являються додаткові поодинокі максимуми; в площині XOZ рівень характеристики спрямованості збільшується.

При збільшенні кількості елементів (система СВ) спрямовану дію випромінювачів починає проявлятися вже на 125 Гц у вертикальній площині. Із зростанням частоти відбувається подальше зменшення ширини основної пелюстки. Як і в системі СА, розкриття головного максимуму відбувається в горизонтальній площині.

Також на частоті 500 Гц з'являються додаткові бічні пелюстки в площині YOZ, а на частоті 1000 Гц - і в площині XOZ.

При заданому співвідношенні відстаней  $d_1 / d_2 = 2$  кут розкриття основної пелюстки у вертикальній площині YOZ на одній частоті стає рівним куту розкриття основної пелюстки в горизонтальній площині XOZ наступної подвоєною частоти.

Коефіцієнт осрової концентрації даної системи відповідно до формули (1.22) дорівнює для системи СА (5 елементів):

$$K = 25 \left\{ 5 + \frac{4 \sin kd_1}{kd_1} + \frac{4 \sin kd_2}{kd_2} + \frac{2 \sin 2kd_1}{2kd_1} + \frac{2 \sin 2kd_2}{2kd_2} + \frac{8 \sin(k\sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{k\sqrt{d_1^2 + d_2^2}} \right\}^{-1} \quad (3.27)$$

для системи СВ (9 елементів):

$$\begin{aligned}
K = 81 \{ & 9 + \frac{8 \sin kd_1}{kd_1} + \frac{8 \sin kd_2}{kd_2} + \frac{6 \sin 2kd_1}{2kd_1} + \frac{6 \sin 2kd_2}{2kd_2} + \frac{4 \sin 3kd_1}{3kd_1} + \frac{4 \sin 3kd_2}{3kd_2} \\
& + \frac{2 \sin 4kd_1}{4kd_1} + \frac{2 \sin 4kd_2}{4kd_2} + \frac{8 \sin(k\sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{k\sqrt{d_1^2 + d_2^2}} + \frac{8 \sin(2k\sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{2k\sqrt{d_1^2 + d_2^2}} + \frac{8 \sin(k\sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{k\sqrt{4d_1^2 + d_2^2}} \\
& + \frac{8 \sin(k\sqrt{d_1^2 + 4d_2^2})}{k\sqrt{d_1^2 + 4d_2^2}} \}^{-1}
\end{aligned} \quad (3.28)$$

На рис. 3.22 представлені залежності коефіцієнта осьової концентрації (КОК) систем типу «хрест» СА і СВ від  $d/\lambda$

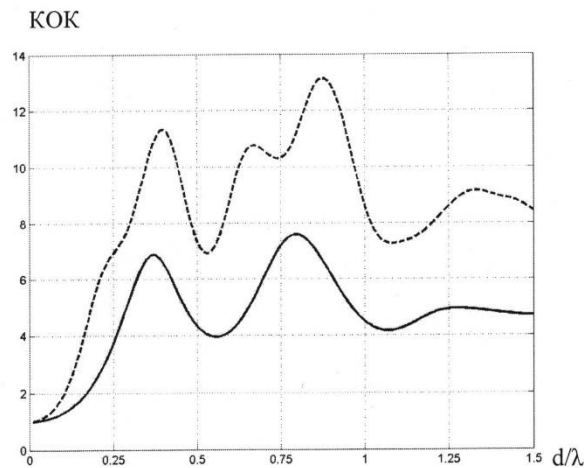


Рис. 3.22. Залежності коефіцієнта осьової концентрації систем типу «хрест» СА і СВ від  $d/\lambda$

Відповідно:

- КОК для системи типу «хрест» СА (5 елементів);
- КОК для системи типу «хрест» СВ (9 елементів).

В обох залежностях коефіцієнта осьової концентрації присутності по кілька максимумів. Абсолютний максимум спостерігається для систем СВ (9 елементів) при відносно  $d/\lambda \approx 0,88$ . Другий менший максимум д. КОК цієї ж системи визначається при  $d/\lambda \approx 0,4$ .

Для системи СА з меншою кількістю елементів коефіцієнтом: концентрації має менші значення своїх максимумів.

У таблиці 3.3 наведені значення максимумів КОК для систем типу «хрест» СА і СВ при відповідних значень  $d/\lambda$ .

	СА(5 елементів)		СВ (9 елементів)	
	1-й max	2-й max	1-й max	2-й max
$d/\lambda$	0.8	0.37	0.8	0.4
КОК	7.6	6.9	13.13	11.3



## **РОЗДІЛ 4. СТАРТАП-ПРОЕКТ**

### **Дослідження особливостей випромінювання звуку системами випромінювачів у вигляді подвійного лінійного масиву та систем типу «хрест»**

Дані дослідження будуються на математичних моделях та методах розрахунків характеристик спрямованості групи випромінювачів шляхом подання їх у вигляді монополів.

#### **Сутність ідеї стартапу.**

Ідеологія полягає в управлінні характеристикою спрямованості (кутом компенсації звукових колонок закріплених паралельно стіні у вертикальній площині) без зміни кута нахилу випромінювачів щодо стіни дозволяти виключити недоліки в озвучуванні приміщень при розміщенні звукових колонок в нішах.

У цьому полягає перевага компенсованих звукових колонок.

#### **Хто є споживачами продукції і в чому полягає ціннісна пропозиція**

Споживачі:

- Кінотеатри
- Власники компаній, яким необхідні оптимальні акустичні умови в офісних приміщеннях.

Ціннісна пропозиція:

- Покращення озвучення кінотеатрів
- Покращення інтер'єру кінотеатрів

#### **Заходи маркетингового просування продукції проекту:**

- Виставки.
- Гранти.
- Реклама на сайтах(в магазинах) з продажу акустичних матеріалів.

- Реклама на сайтах(в магазинах) монтажних виробів, ремонтних послуг.
- Реклама на YouTube.

### **Канали збуту продукції.**

Прямі канали збуту (директ маркетинг - та інтернет-маркетинг):

- Державні та приватні підприємства.
- Залучення іноземних інвесторів (країни Європи)

### **Підведення проміжних підсумків.**

В даному розділі було розроблено перший етап створення стартап-проекту. Кожна наукова робота повинна знаходити своє місце в застосуванні у реальному житті, тому стартап-проект може бути практичним відображенням наукової праці.

Спочатку було висвітлено зміст ідеї проекту. Для цього було розглянуто актуальність проекту на сьогоднішній день, вирішення проблем за допомогою даного проекту.

Далі було проведено аналіз ринку конкурентів та їх пропозицій. Врахувавши переваги і недоліки продукції конкурентів, можна зробити висновок про подальше успішне втілення проекту в життя.

Для уникнення провалу проекту, потрібно провести потужну рекламну кампанію, в якій донести до споживача усі переваги даного проекту, та необхідність обрати саме запропонований продукт.

## ВИСНОВКИ

У роботі був виконаний розрахунок, побудова та аналіз характеристик спрямованості складної конфігурації (найпростіших зі складних нестандартних конфігурацій), таких як: подвійний лінійний масив та системи типу «хрест».

Аналіз даної системи випромінювача з метою досягнення максимально «плоскою» характеристики спрямованості (великого кута розкриву в горизонтальній площині і малого - у вертикальній) показав, що. з усіх розглянутих найкращі оптимальні показники за даними параметрам.

Хоча відстані між випромінювачами ( $d$  вибиралося з позиції можливих реальних джерел звуку, в дослідженні не були враховані взаємодії між випромінювачами.

Якщо відстань між елементами  $d$  більше, ніж  $0,3\lambda$ , то взаємодія відсутня. Якщо менше - має місце взаємодія в ближньому полі. Але оскільки на низьких частотах випромінювач не спрямований, то, незважаючи на взаємодію, його характеристика спрямованості все ж залишиться ненаправленою, але зміниться випромінює потужність. Характеристика спрямованості досліджуваних систем розглядається в далекому полі і нормується, тому взаємодія ролі не грає, тобто не позначиться на вигляді характеристики спрямованості (але змінить випромінюється потужність).

Навіть якщо припустити, що ми маємо реальні гучномовці, то на низьких частотах вони також не спрямовані, і тому в далекому полі зберігається та ж картина.

Якщо подивитися звукове поле не в далекому полі (в передніх рядах залу), то на низьких частотах саме поняття характеристики спрямованості тут не може вживатися, оскільки ми не виконуємо умова  $r \gg \lambda$ .

Оскільки спрямованість створюється за рахунок інтерференції звукових хвиль в точці спостереження (прийому), то використані математичні моделі дозволяють визначити основні закономірності. Тобто, проведені дослідження можна віднести до ряду попередніх (теоретичних завдань), які в майбутньому при побудові більш

складних точних моделей даних систем можуть вказувати подальші напрямки досліджень і пошуку інших електроакустичних систем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анерт В., Райхард В. Основы техники звукоусиления: Пер. с нем. - М.: Радио и связь, 1984. - 320 с., ил.
2. Качерович А.Н. Акустика зрительного зала. - М.: Искусство, 1968.
3. Фурдуев В.В. Электроакустика. - М.: ОГИЗ, гос. изд-во техн.- теор.лит., 1948. - 515 с., ил.
4. Сапожков М.А. Звукофикация помещений: Проектирование и расчет. - М.: Связь, 1979. - 144 с., ил.
5. [www.install-pro.ru/archive/006/52-54.shtml](http://www.install-pro.ru/archive/006/52-54.shtml)
6. Математическое моделирование: Проблемы и результаты. - М.: Наука, 2003.-235 с.
7. Математизация современной науки: предпосылки, проблемы, перспективы. -М., 1976. - 158 с., ил.
8. Гульяев В. Визуальное моделирование в среде MATLAB. - С.П., «Питер», 2000. - 560 с.
9. Грінченко В.Т., Дідковський В.С., Маципура В.Т. Теоретичні основи акустики: Навчальний посібник. - К.: ІЗМН, 1998. - 376 с., ил.
10. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. - Л., Судостроение, 1984. - 304 с., ил. - (Библиотека инженера-гидроакустика).
11. Исакович М.А. Общая акустика: Учебное пособие. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973. - 496 с., ил.
12. Тюлин В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1976. - 256 с., ил.
13. Румынская И.А. Основы гидроакустики. - Л.: Судостроение, 1979. - 216 с., ил.
14. Скучик Е. Основы акустики. Т. 1,2. -М.: Мир, 1976. - 750 с., ил.